

Міністерство освіти і науки України  
Науково-методичний центр вищої освіти  
Донбаська державна машинобудівна академія

**С.А. Шоно, Ю.В. Менафова**

## **Посібник-довідник**

### **до лекційних курсів**

**«Теплотехніка та теплоенергетика» і**

**«Теоретичні основи теплотехніки»**

Краматорськ, 2001

Міністерство освіти і науки України  
Науково-методичний центр вищої освіти  
Донбаська державна машинобудівна академія

**С.А. Шоно, Ю.В. Менафова**

**Посібник-довідник**  
**до лекційних курсів**  
**«Теплотехніка та теплоенергетика» і**  
**«Теоретичні основи теплотехніки»**

Рекомендовано Міністерством освіти і  
науки України як учбовий посібник для  
студентів вищих навчальних закладів

Краматорськ, 2001

**Шоно С.А., Менафова Ю.В.** Довідник-посібник до лекційних курсів “Теплотехніка та теплоенергетика” і “Теоретичні основи теплотехніки”.- Краматорськ, ДДМА, 2001.-136с.

Довідковий посібник до лекційних курсів містить короткі теоретичні відомості /реферат/, терміни і позначення, поняття і визначення, закони і формулювання, основні формули, малюнки, графіки, таблиці, запитання для самоконтролю, типові задачі з розв’язаннями та задачі для самостійного розв’язання.

Довідковий посібник допомагає студенту при виконанні домашніх завдань та курсового проекту, коли необхідно визначити числові значення певних коефіцієнтів, чисел подібності та конкретних теплофізичних параметрів. Він сприяє більш ефективній самостійній роботі студентів та допомагає під час проведення лабораторних і практичних занять та при виконанні курсового проекту.

ISBN 5-7763-8552-0

С.А.Шоно, доц.,  
Ю.В.Менафова, асист.

Редактор

Єрьоміна Н.В.

# 1 Основи технічної термодинаміки

## 1.1 Реферат

Технічна термодинаміка як розділ фізики. Предмет технічної термодинаміки та її задачі. Основні термодинамічні параметри стану. Термодинамічні системи та процеси. Рівняння стану ідеальних газів. Основні закони ідеальних газів. Суміші ідеальних газів. Властивості реальних газів. Перший закон термодинаміки. Внутрішня енергія. Робота розширення. Ентальпія. Теплоємність газів. Ентропія. Термодинамічні процеси ідеальних газів. Другий закон термодинаміки. Цикл Карно. Водяний пар, основні параметри, діаграми водяного пару. Витікання газів та парів. Дроселювання газів. Основні параметри вологого повітря,  $i$ -діаграма вологого повітря.

## 1.2 Терміни, позначення

Терміни	Літерне позначення	Одиниця виміру
Довжина	<b><math>l</math></b>	м
Маса	<b><math>m</math></b>	кг
Час	<b><math>\tau</math></b>	с
Температура	<b><math>T</math></b>	К
Кількість речовини	<b><math>\mu</math></b>	моль
Енергія	<b><math>E</math></b>	Дж
Сила	<b><math>N</math></b>	Н
Потужність	<b><math>Q</math></b>	Вт
Питомий об'єм	$V$	м <sup>3</sup> /кг
Густина	<b><math>\rho</math></b>	кг/ м <sup>3</sup>
Тиск	<b><math>p</math></b>	Па
Площа	<b><math>F</math></b>	м <sup>2</sup>
Питома теплота	<b><math>q</math></b>	Вт/м <sup>2</sup>
Газова постійна	<b><math>R</math></b>	Дж/(кг·К)
Теплоємність	<b><math>C_v, C_R</math></b>	Дж/(кг·К)
Внутрішня енергія	<b><math>u</math></b>	Дж/кг
Ентальпія	<b><math>i</math></b>	Дж/кг
Ентропія	$S$	Дж/(кг·К)
Швидкість	$\omega$	м/с
Відносна вологість	<b><math>\varphi</math></b>	%
Вологозміст	<b><math>d</math></b>	г/кг
Парціальний тиск	<b><math>P_i</math></b>	Па

### 1.3 Поняття, визначення

Відносна вологість- відношення дійсної абсолютної вологості до максимально можливої абсолютної вологості при даній температурі повітря.

Вологозміст- відношення маси водяного пару у вологому повітрі до маси сухого повітря в ньому.

Внутрішня енергія газу- сума кінетичної та потенційної енергії газу, є функція температури газу.

Густина- відношення маси газу до його об'єму.

Газова постійна- фізична постійна, що залежить від природи газу, не залежить від його стану, та чисельно дорівнює роботі, яку виконує один кілограм газу при нагріванні на один градус.

Довжина- характеризує розмір тіла.

Ентальпія- це повна енергія газу, яка складається із його внутрішньої енергії та потенційної, яка обумовлена тим, що газ знаходиться під тиском. Ентальпія є функцією температури і не залежить від інших параметрів газу.

Ентропія- це однозначна функція стану газу і дорівнює відношенню кількості теплоти до абсолютної температури газу (приведена теплота).

Кількість речовини (молярна маса)- це маса моля речовини, яка задана в кілограмах і чисельно дорівнює молекулярній масі речовини.

Парціальний тиск- це тиск, який мав би даний компонент газової суміші, якби він один займав весь об'єм газової суміші при тій же температурі.

Питомий об'єм- об'єм одиниці маси газу.

Питома теплота- відношення густини теплового потоку до площі поверхні тіла.

Температура- характеризує ступінь нагрітості тіла і представляє собою міру середньої кінетичної енергії руху усіх молекул газу.

Теплоємність- відношення кількості тепла, яке витратили на нагрівання газу, до зміни його температури.

Термодинамічний процес- сукупність змін стану газу при переході від одного рівноважного стану до другого.

Термодинамічна рівновага- якщо стан всіх тіл, що входять до термодинамічної системи, не змінюється.

Ідеальний газ- це газ, у якого немає сил притягання та відштовхування між молекулами, а молекули практично не мають об'єму (в порівнянні із об'ємом газу).

Тиск- це середній результат ударів молекул газу об стінки сосуду, в якому знаходиться газ. Тиск представляє собою відношення сили, що діє по нормалі на поверхню, до площі поверхні.

Пароутворення- процес перетворення речовини із стану рідини до газоподібного стану.

Випаровування- процес пароутворення, який відбувається при будь-якій температурі на вільній поверхні рідини.

Кипіння- процес пароутворення, який відбувається як на вільній поверхні рідини, так і всередині неї при певній температурі, яка залежить від властивостей рідини і тиску.

Конденсація- перехід речовини із стану газу до рідини або твердого тіла.

Насичений пар- це пар, який контактує із рідиною і знаходиться із нею в стані термічної рівноваги.

Сухий насичений пар- це насичений пар, в якому відсутні високодисперсні частини рідини.

Вологий насичений пар- це насичений пар, в якому є високодисперсні частини рідини.

Ступінь сухості пару- це масова доля сухого насиченого пару у вологому.

Перегрітий пар- це пар, який при певному тиску має більш високу температуру, ніж сухий.

Потрійна точка води- це стан води, коли вона одночасно перебуває у трьох фазах: лід, рідина, пар.

Теплота пароутворення- кількість теплоти, яка витрачена на пароутворення 1 кг води при температурі кипіння до сухого насиченого пару.

Сопло- канал, в якому збільшується швидкість та зменшується тиск газу.

Дифузор- канал, в якому збільшується тиск та зменшується швидкість газу.

Дроселювання- зменшення тиску газу без виконання зовнішньої роботи при переході через отвір, який звужується.

Вологе повітря- суміш сухого повітря із водяним паром.

Абсолютна вологість- маса водяного пару в 1 м<sup>3</sup> повітря.

Температура точки роси- температура повітря дорівнює температурі насичення при даному парціальному тиску водяного пару.

## **1.4 Закони, формулювання**

### Закон Бойля-Маріота:

При постійній температурі об'єм, який займає ідеальний газ, змінюється обернено пропорційно його тиску.

### Закон Гей-Люсака:

При постійному тиску об'єм однієї і тієї кількості ідеального газу змінюється прямо пропорційно абсолютній температурі.

### Закон Шарля:

При постійному об'ємі тиск ідеального газу прямо пропорційний абсолютній температурі.

### Закон Авогадро:

При однаковій температурі густини газів прямо пропорційні їх молекулярним масам.

### Закон Дальтона:

Загальний тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків окремих газів, які складають суміш.

### Перший закон термодинаміки:

Підведена до робочого тіла теплота витрачається на зміну його внутрішньої енергії та виконання зовнішньої роботи.

### Другий закон термодинаміки:

Теплота не може переходити від холодного тіла до більш нагрітого само собою даровим процесом (без компенсації).

### Перший закон термодинаміки для потоку газу:

Теплота, що підводиться до потоку газу, витрачається на зміну його ентальпії, кінетичної енергії та виконання корисної роботи.

### 1.5 Основні формули

Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрону):

$$PV = mRT$$

Рівняння стану ідеального газу Клапейрону-Менделєєва:

$$PV\mu = 8,314T$$

Зміна внутрішньої енергії:

$$\Delta U = C_V(T_2 - T_1)$$

Робота розширення газу:

$$dl = PdV; \quad l = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

Зміна ентальпії, ентальпія:

$$\Delta i = C_p(T_2 - T_1); \quad i = U + PV$$

Рівняння першого закону термодинаміки:

$$\Delta q = \Delta U + l$$

Ентропія:

$$dS = \frac{dq}{T}$$

Зміна ентропії:

$$S_2 - S_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad ; S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$S_2 - S_1 = C_p \ln \frac{V_2}{V_1} + C_V \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Рівняння ізохорного процесу:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Рівняння ізобарного процесу:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Рівняння ізотермного процесу:

$$PV = const$$

Рівняння адіабатного процесу:

$$PV^K = const$$

Термічний ККД прямого циклу:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = \frac{l}{q_1}$$

Холодильний коефіцієнт циклу:

$$\varepsilon = q_2 / l$$

Рівняння нерозривності потоку газу:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{f_2}{f_1}$$

Рівняння руху газу:

$$\omega d\omega = -VdP$$

Швидкість витікання газу:

$$\omega_2 = \sqrt{2(i_1 - i_2)} = \sqrt{2 \left[ \frac{K}{K-1} \right] (P_1 V_1 - P_2 V_2)}$$

Масові витрати газу:

$$m = a\omega / V_2$$

Критичний тиск:

$$P_K = \beta_K P_1 = \left[ \frac{2}{K+1} \right]^{\frac{K}{K-1}} \cdot P_1$$

Рівняння процесу дроселювання:

$$i_1 = i_2 .$$

## 1.6 Малюнки, графіки, таблиці

Таблиця 1.6.1-Фізичні постійні деяких газів

Газ	Хімічна формула	Відносна молекулярна маса	Газова постійна R, Дж/кг	Густина газу, кг/м <sup>3</sup>
<b>Кисень</b>	O <sub>2</sub>	32	259,8	1,429
Водень	H <sub>2</sub>	2	4124,3	0,090
Азот	N <sub>2</sub>	28	296,8	1,250
Окисел вуглецю	CO	28	296,8	1,250
Повітря	—	28,96	287	1,293
Вуглекислий газ	CO <sub>2</sub>	44	189	1,977
Водяний пар	H <sub>2</sub> O	18	481,6	0,804
Гелій	He	4	2077,2	0,178
Аргон	Ar	40	208,2	1,784
Аміак	N H <sub>3</sub>	17	488,2	0,771



**Таблиця 1.6.2- Сухий насичений пар та вода по кривій насичення (в залежності від температури)**

T, °C	P <sub>н</sub> , МПа	V', м³/кг	V'', м³/кг	ρ, кг/м³	i', кДж/кг	i'', кДж/кг	г, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0	2500,8	2500,8	0	9,1644
5	0,0008718	0,0010001	147,2	0,006793	21,06	2510	2489	0,0762	9,0242
10	0,0012271	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
15	0,001704	0,001001	77,97	0,01282	62,97	2528,4	2465,4	0,2244	8,7806
20	0,002337	0,0010018	57,84	0,01729	83,9	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
25	0,003167	0,001003	34,4	0,02304	104,8	2546,4	2441,7	0,3672	8,557
30	0,004241	0,0010044	32,93	0,03036	125,69	2555,6	2430	0,4367	8,4523
35	0,005622	0,001006	25,25	0,0396	146,58	2564,8	2418,3	0,5049	8,3518
40	0,007375	0,0010079	19,55	0,05115	167,51	2573,6	2406,1	0,5723	8,256
45	0,009582	0,0010099	15,28	0,06545	188,41	2582,4	2394	0,6385	8,1638
50	0,012335	0,0010121	12,05	0,08302	209,3	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
55	0,015741	0,0010145	9,578	0,1044	230,19	2600,4	2370,1	0,7679	7,9901
60	0,01992	0,0010171	7,678	0,1302	251,12	2609,2	2358	0,8311	7,9084
65	0,02501	0,0010199	6,201	0,1613	272,06	2617,6	2345,4	0,8935	7,8297
70	0,03116	0,0010228	5,045	0,1982	292,99	2626,4	2333,3	0,955	7,7544
80	0,4736	0,001029	3,409	0,2933	334,94	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	376,98	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,1	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
110	0,14327	0,0010515	1,21	0,8263	416,34	2691,3	2230	1,4185	7,2386
120	0,19854	0,0010603	0,8917	1,122	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
130	0,27011	0,0010697	0,6683	1,496	546,4	2720,6	2174,2	1,6345	7,0271
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,1	2734	2144,9	1,7392	6,9304
150	0,476	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746,5	2114,3	1,8418	6,8383
160	0,618	0,0011021	0,3068	3,259	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
170	0,792	0,0011144	0,2426	4,122	719,3	2768,7	2049,4	2,0419	6,666
180	1,0027	0,0011275	0,1939	5,157	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
190	1,2553	0,0011415	0,1564	6,395	807,6	2786,3	1978,7	2,2358	6,5075

Продовження таблиці 1.6.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
200	1,555	0,0011565	0,1272	7,863	852,4	2793	1940,6	2,3308	6,4318
210	1,908	0,0011726	0,1044	9,578	897,6	2798	1900,4	2,4246	6,3577
220	2,3202	0,00119	0,08606	11,62	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848
230	2,7979	0,0012087	0,07147	13,99	990,2	2803,1	1812,7	2,6101	6,2132
240	3,348	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
250	3,978	0,0012512	0,05005	19,98	1086,1	2801	1714,9	2,7934	6,0721
260	4,694	0,0012755	0,04215	23,72	1135	2796,4	1661,3	2,8851	6,0014
270	5,505	0,0013023	0,0356	28,09	1185,3	2789,7	1604,4	2,9764	5,9298
280	6,419	0,0013321	0,03013	33,19	1236,8	2779,6	1542,8	3,0685	5,8573
290	7,445	0,0013655	0,02553	39,17	1290	2766,2	1476,3	3,161	5,7824
300	8,592	0,0014036	0,02164	46,21	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049
310	9,869	0,001447	0,01831	54,61	1402,2	2727,3	1325,1	3,3507	5,6233
320	11,28	0,001499	0,01545	64,74	1462	2699,6	1237,6	3,4495	5,5354
330	12,864	0,001562	0,01297	77,09	1526,1	2665,7	1139,6	3,5521	5,4412
340	14,608	0,001639	0,01078	92,77	1594,8	2621,8	1027	3,6605	5,3361
350	16,537	0,001741	0,00880	113,6	1671,4	2564,6	893	3,7786	5,2117
360	18,674	0,001894	0,00694	144,1	1761,4	2481,1	719,7	3,9163	5,053
370	21,053	0,00222	0,00493	202,4	1892,4	2330,8	438,4	4,1135	4,7951
474	22,087	0,0028	0,00347	288	2031,9	2147	114,7	4,3258	4,5029

Таблиця 1.6.3. Сухий насичений пар та вода по кривій насичення (по тиску)

P, МПа	t <sub>н</sub> , °C	V', м³/кг	V'', м³/кг	ρ, кг/м³	i', кДж/кг	i'', кДж/кг	r, кДж/кг	s', кДж/(кг·K)	s'', кДж/(кг·K)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,001	6,936	0,001	130,04	0,0077	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,002	17,486	0,001	67,24	0,0149	73,4	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,0025	21,071	0,001	54,42	0,0184	88,36	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424
0,003	24,078	0,001	45,77	0,0219	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784

**Продовження таблиці 1.6.3**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,004	29,95	0,001	34,93	0,0286	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,005	32,89	0,001	28,24	0,0354	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,006	36,17	0,001	23,77	0,0421	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,008	41,53	0,001	18,13	0,0552	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2273
0,01	45,82	0,001	14,7	0,0681	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,014	52,57	0,001	10,69	0,0935	220,05	2596,1	2376	0,7368	8,0305
0,018	57,82	0,001	8,448	0,1184	242,03	2605,4	2363,3	0,804	7,9445
0,02	60,08	0,001	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,025	64,99	0,001	6,201	0,1613	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,83
0,03	69,12	0,001	5,232	0,1911	289,3	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,04	75,87	0,001	3,999	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,671
0,05	81,33	0,001	3,243	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,06	85,94	0,001	2,734	0,3658	359,9	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,08	93,5	0,001	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,1	99,62	0,001	1,696	0,5896	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
0,12	104,8	0,001	1,43	0,6992	439,34	2683	2243,6	1,361	7,2972
0,16	113,31	0,0011	1,092	0,916	475,41	2696,3	2220,8	1,455	7,2017
0,2	120,23	0,0011	0,886	1,129	504,74	2706,8	2202	1,5306	7,1279
0,26	128,73	0,0011	0,6929	1,443	541,2	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
0,3	133,54	0,0011	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,8	1,6716	6,9922
0,4	143,62	0,0011	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,5	151,84	0,0011	0,3749	2,667	640,1	2748,9	2108,7	1,8605	6,8221
0,6	158,84	0,0011	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
0,8	170,41	0,0011	0,2403	4,161	720,9	2769	2048,1	2,0461	6,663
1	179,88	0,0011	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
1,2	187,95	0,0011	0,1633	6,125	798,4	2784,6	1986,2	2,2156	6,5224
1,4	195,04	0,0011	0,1408	7,102	830	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
1,6	201,36	0,0012	0,1238	8,08	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
1,8	207,1	0,0012	0,1104	9,055	884,2	2796,5	1912,3	2,3975	6,3794
2	212,36	0,0012	0,0996	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411

**Продовження таблиці 1.6.3**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2,4	221,77	0,0012	0,0832	12,01	951,8	2801,8	1850	2,5346	6,2727
2,8	230,04	0,0012	0,0774	14	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
3	233,83	0,0012	0,0666	15,01	1009,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
3,5	242,54	0,0012	0,0571	17,53	1049,8	2802,8	1753	2,7251	6,1249
4	250,33	0,0013	0,0498	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5	263,91	0,0013	0,0394	25,39	1154,2	2793,9	1639,6	2,921	5,9739
6	275,56	0,0013	0,0324	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
7	285,8	0,0014	0,0274	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
8	294,98	0,0014	0,0235	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
9	303,31	0,0014	0,0205	48,8	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
10	310,96	0,0015	0,018	55,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
11	318,04	0,0015	0,016	62,62	1450,2	2705,2	1255	3,4297	5,5528
12	324,64	0,0015	0,0143	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,493
13	330,81	0,0016	0,0128	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
14	330,63	0,0016	0,0115	87,04	1570,8	2637,9	1067	3,6233	5,3731
16	347,32	0,0017	0,0093	107,3	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
18	356,96	0,0018	0,0075	133,2	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
20	365,71	0,002	0,0059	170,5	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,928
22	373,7	0,0027	0,0037	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

Таблиця 1.6.4-Середня молярна теплоємність газів при постійному тиску

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Повітря (абсолютно сухе)
0	29,274	29,019	29,123	35,86	33,499	38,85	29,073
100	29,538	29,048	29,178	38,112	33,741	40,65	29,152
200	29,931	29,132	29,303	40,059	34,118	42,33	29,299
300	30,4	29,287	29,517	41,755	34,575	43,88	29,521
400	30,878	29,5	29,789	43,25	35,09	45,22	29,789
500	31,334	29,764	30,099	44,573	35,63	46,39	30,095
600	31,761	30,044	30,425	45,453	36,195	47,35	30,405
700	32,15	30,341	30,752	46,813	36,789	48,23	30,723
800	32,502	30,635	31,07	47,763	37,392	48,94	31,028
900	32,825	30,924	31,376	48,617	38,008	49,61	31,321
1000	33,118	31,196	31,665	49,392	38,619	50,16	31,598
1100	33,386	31,455	31,937	50,099	39,226	50,66	31,862
1200	33,633	31,707	32,192	50,74	39,825	51,08	32,109
1300	33,863	31,941	32,427	51,322	40,407	-	32,343
1400	34,076	32,163	32,653	51,858	40,976	-	32,575
1500	34,282	32,372	32,858	52,348	41,525	-	32,774
1600	34,474	32,565	33,051	52,8	42,056	-	32,967
1700	34,658	32,749	33,231	53,218	42,576	-	33,151
1800	34,834	32,917	33,402	53,504	43,07	-	33,319
1900	35,006	33,08	33,561	53,959	43,539	-	33,482
2000	35,169	33,231	33,708	54,29	43,995	-	33,641

Таблиця 1.6.5-Середня молярна теплоємність газів при постійному об'ємі

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Повітря (абсолютно сухе)
0	20,959	20,704	20,808	27,545	25,184	30,52	20,758
100	21,223	20,733	20,863	29,797	25,426	32,52	20,838
200	21,616	20,8	20,988	31,744	25,803	34	20,984
300	22,085	20,972	21,202	33,44	26,26	35,55	21,206
400	22,563	21,185	21,474	34,935	26,775	36,89	21,474
500	23,019	21,449	21,784	36,258	27,315	38,06	21,78
600	23,446	21,729	22,11	37,438	27,88	39,02	22,09
700	23,835	22,027	22,437	38,498	28,474	39,9	22,408
800	24,187	22,32	22,755	39,448	29,077	40,61	22,713
900	24,51	22,609	23,061	40,302	29,693	42,28	23,006
1000	24,803	22,881	23,35	41,077	30,304	41,83	23,283
1100	25,071	23,14	23,622	41,784	30,911	42,33	23,547
1200	25,318	23,322	23,877	42,425	31,51	42,75	23,794
1300	25,548	23,626	24,112	43,007	32,092	-	24,028
1400	25,761	23,848	24,338	43,543	32,661	-	24,25
1500	25,967	24,057	24,543	44,033	33,21	-	24,459
1600	26,159	24,25	24,736	44,485	33,741	-	24,652
1700	26,343	24,434	24,916	44,903	34,261	-	24,836
1800	26,519	24,602	25,087	45,289	34,755	-	25,004
1900	26,691	24,765	25,246	45,644	35,224	-	25,167
2000	26,854	24,916	25,393	45,975	35,68	-	25,326

Таблиця 1.6.6-Середня масова теплоємність газів при постійному тиску

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Повітря (абсолютно сухе)
0	0,9148	1,0304	1,0396	0,8148	1,8594	0,607	1,0036
100	0,9282	1,0316	1,0417	0,8658	1,8728	0,636	1,0061
200	0,9353	1,0346	1,0463	0,9102	1,8937	0,662	1,0115
300	0,95	1,04	1,0538	0,9487	1,9192	0,687	1,0191
400	0,9651	1,0475	1,0634	0,9826	1,9477	0,708	1,0283
500	0,9793	1,0567	1,0748	1,0128	1,9778	0,724	1,0387
600	0,9927	1,0668	1,0861	1,0396	2,0092	0,737	1,0496
700	1,0048	1,0777	1,0978	1,0639	2,0419	0,754	1,0605
800	1,0157	1,0881	1,1091	1,0852	2,0754	0,762	1,071
900	1,0258	1,0982	1,12	1,1045	2,1097	0,775	1,0815
1000	1,035	1,1078	1,1304	1,1225	2,1436	0,783	1,0907
1100	1,0434	1,117	1,1401	1,1384	2,1771	0,791	1,0999
1200	1,0509	1,1258	1,1493	1,153	2,2106	0,795	1,1082
1300	1,058	1,1342	1,1577	1,166	2,2429	-	1,1166
1400	1,0647	1,1422	1,1656	1,1782	2,2743	-	1,1242
1500	1,0714	1,1497	1,1731	1,1895	2,3048	-	1,1313
1600	1,0773	1,1564	1,1798	1,1995	2,3346	-	1,138
1700	1,0831	1,1631	1,1865	1,2091	2,363	-	1,1443
1800	1,0886	1,169	1,1924	1,2179	2,3907	-	1,1501
1900	1,094	1,1748	1,1983	1,2259	2,4166	-	1,156
2000	1,099	1,1803	1,2033	1,2334	2,4422	-	1,161

Таблиця 1.6.7-Середня масова теплоємність газів при постійному об'ємі

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Повітря (абсолютно сухе)
0	0,6548	0,7352	0,7427	0,6259	1,398	0,477	0,7164
100	0,6632	0,7365	0,7448	0,677	1,4114	0,507	0,7193
200	0,6753	0,7394	0,7494	0,7214	1,4323	0,532	0,7243
300	0,69	0,7448	0,757	0,7599	1,4574	0,557	0,7319
400	0,7051	0,7524	0,7666	0,7938	1,4863	0,578	0,7415
500	0,7193	0,7616	0,7775	0,824	1,516	0,595	0,7519
600	0,7827	0,7716	0,7892	0,8508	1,5474	0,607	0,7624
700	0,7448	0,7821	0,8009	0,8746	1,5805	0,624	0,7733
800	0,7557	0,7926	0,8122	0,8964	1,614	0,632	0,7842
900	0,7658	0,803	0,8231	0,9157	1,6483	0,645	0,7942
1000	0,775	0,8127	0,8336	0,9332	1,6823	0,653	0,8039
1100	0,7834	0,8219	0,8432	0,9496	1,7158	0,662	0,8127
1200	0,7913	0,8307	0,8566	0,9638	1,7488	0,666	0,8215
1300	0,7984	0,839	0,8608	0,9772	1,7815	-	0,8294
1400	0,8051	0,847	0,8688	0,9893	1,8129	-	0,8369
1500	0,8114	0,8541	0,8763	1,0006	1,8434	-	0,8441
1600	0,8173	0,8612	0,883	1,0107	1,8728	-	0,8508
1700	0,8231	0,8675	0,8893	1,0203	1,9016	-	0,857
1800	0,8286	0,8738	0,8956	1,0291	1,9293	-	0,8633
1900	0,834	0,8792	0,9014	1,0371	1,9552	-	0,8688
2000	0,839	0,8847	0,9064	1,0446	1,9804	-	0,8742

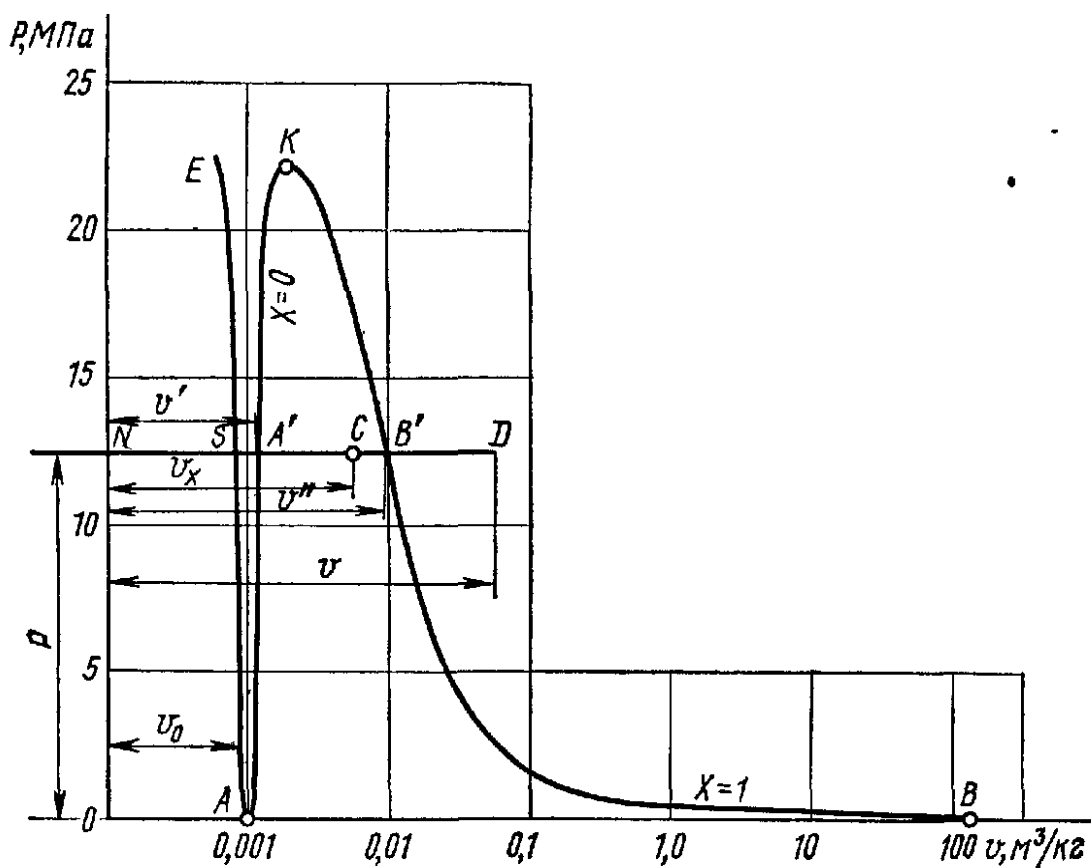
Таблиця 1.6.8-Середня об'ємна теплоємність газів при постійному тиску

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Повітря (абсолютно сухе)
0	1,3059	1,2946	1,2992	1,5998	1,493	1,733	1,2971
100	1,3176	1,2958	1,3017	1,7003	1,502	1,813	1,3004
200	1,3352	1,2996	1,3071	1,7873	1,5223	1,888	1,3071
300	1,3561	1,3067	1,3167	1,8627	1,5424	1,955	1,3172
400	1,3775	1,3163	1,3289	1,9297	1,5654	2,018	1,3289
500	1,398	1,3276	1,3427	1,9887	1,5897	2,068	1,3427
600	1,4168	1,3402	1,3574	2,0411	1,6148	2,114	1,3565
700	1,4344	1,3536	1,372	2,0884	1,6412	2,152	1,3708
800	1,4499	1,367	1,3862	2,1311	1,668	2,181	1,3842
900	1,4645	1,3796	1,3396	2,1692	1,6957	2,215	1,3976
1000	1,4775	1,3917	1,4126	2,2035	1,7229	2,236	1,4097
1100	1,4892	1,4034	1,4248	2,2349	1,7501	2,261	1,4214
1200	1,5005	1,4143	1,4361	2,2638	1,7769	2,278	1,4327
1300	1,5106	1,4252	1,4465	2,2898	1,8028	-	1,4432
1400	1,5202	1,4348	1,4566	2,3136	1,828	-	1,4528
1500	1,5294	1,444	1,4658	2,3354	1,8527	-	1,462
1600	1,5378	1,4528	1,4746	2,3555	1,8761	-	1,4708
1700	1,5462	1,4612	1,4825	2,3743	1,8996	-	1,4867
1800	1,5541	1,4687	1,4901	2,3915	1,9213	-	1,4867
1900	1,5617	1,4758	1,4972	2,4074	1,9423	-	1,4939
2000	1,5692	1,4825	1,5039	2,4221	1,9628	-	1,501

Таблиця 1.6.9-Середня об'ємна теплоємність газів при постійному об'ємі

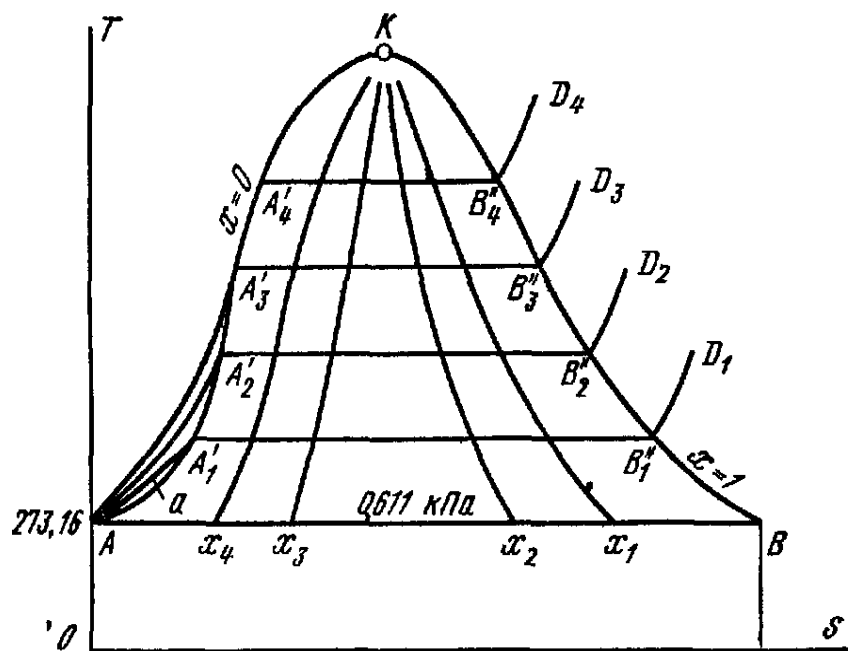
t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Повітря (абсолютно сухе)
0	0,9349	0,9236	0,9282	1,2288	1,1237	1,361	0,9261
100	0,9466	0,9249	0,9307	1,3293	1,1342	1,44	0,9295
200	0,9642	0,9286	0,9362	1,4164	1,1514	1,516	0,9362
300	0,9852	0,9357	0,9458	1,4918	1,1715	1,587	0,9462
400	1,0065	0,9454	0,9579	1,5587	1,1945	1,645	0,9579
500	1,027	0,9567	0,9718	1,6178	1,2188	1,7	0,9718
600	1,0459	0,9692	0,9864	1,6701	1,2439	1,742	0,9856
700	1,0634	0,9826	1,0011	1,7174	1,2703	1,779	0,9998
800	1,0789	0,996	1,0153	1,7601	1,2971	1,813	1,0132
900	1,0936	1,0086	1,0287	1,7982	1,3247	1,842	1,0262
1000	1,1066	1,0207	1,0417	1,8326	1,3519	1,867	1,0387
1100	1,1183	1,0325	1,0538	1,864	1,3791	1,888	1,0505
1200	1,1296	1,0434	1,0651	1,8929	1,4059	1,905	1,0618
1300	1,1396	1,0542	1,0756	1,9188	1,4319	-	1,0722
1400	1,1493	1,0639	1,0856	1,9427	1,457	-	1,0819
1500	1,1585	1,0731	1,0948	1,9644	1,4817	-	1,0911
1600	1,1669	1,0819	1,1036	1,9845	1,5052	-	1,0999
1700	1,1752	1,0902	1,1116	2,0034	1,5286	-	1,1078
1800	1,1832	1,0978	1,1191	2,0205	1,5504	-	1,1158
1900	1,1907	1,1049	1,1262	2,0365	1,5713	-	1,1229
2000	1,1978	1,1116	1,1329	2,0511	1,5918	-	1,1296

T, К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^{-2}$ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /ч	$\mu \cdot 10^5$	$\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
263	1,342	1,009	2,361	6,28	1,67	12,43	0,712
273	1,293	1,005	2,442	6,77	1,72	13,28	0,707
283	1,247	1,005	2,512	7,22	1,77	14,16	0,705
293	1,205	1,005	2,593	7,71	1,81	15,06	0,703
303	1,165	1,005	2,675	8,23	1,86	16	0,701
313	1,128	1,005	2,756	8,75	1,91	16,96	0,699
323	1,093	1,005	2,826	9,26	1,96	17,95	0,698
333	1,06	1,005	2,896	9,79	2,01	18,97	0,696
343	1,029	1,009	2,966	10,28	2,06	20,02	0,694
353	1	1,009	2,047	10,87	2,11	21,09	0,692
363	0,972	1,009	3,128	11,48	2,15	22,1	0,69
373	0,946	1,009	3,21	12,11	2,19	23,13	0,688
393	0,898	1,009	3,338	13,26	2,29	25,45	0,686
413	0,854	1,013	3,489	14,52	2,37	27,8	0,684
433	0,815	1,017	3,64	15,8	2,45	30,09	0,682
453	0,779	1,021	3,78	17,1	2,53	32,49	0,681
473	0,746	1,026	3,931	18,49	2,6	34,85	0,68
523	0,674	1,038	4,268	21,96	2,74	40,61	0,677
573	0,615	1,047	4,606	25,76	2,97	48,33	0,674

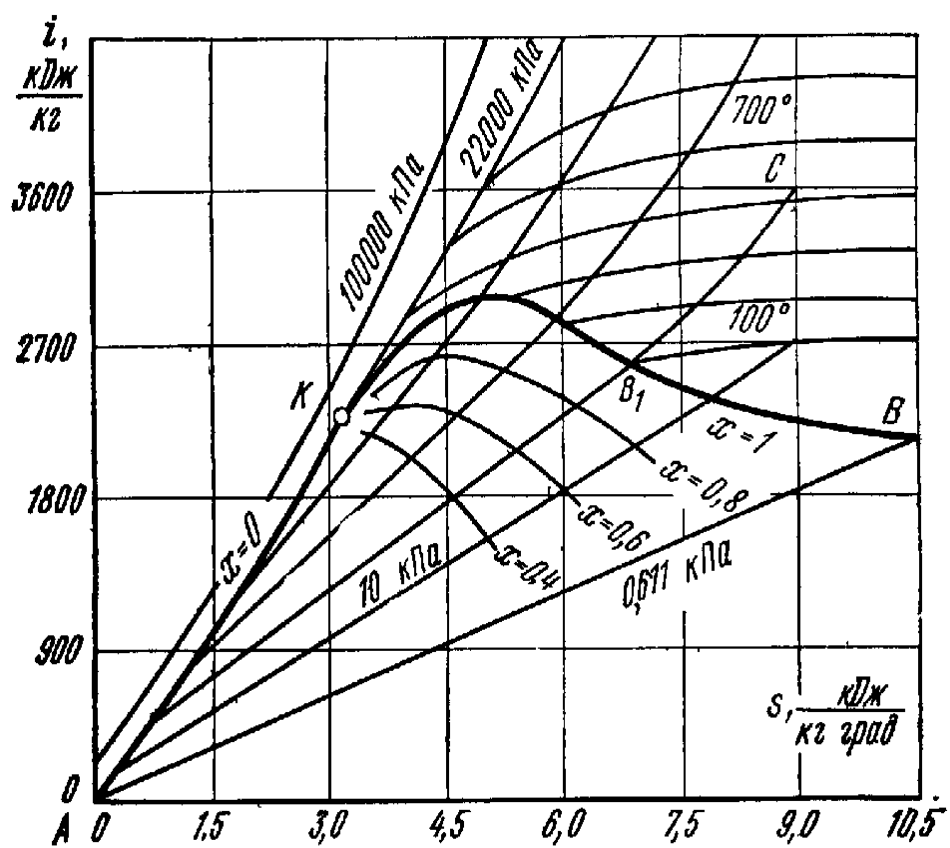


96

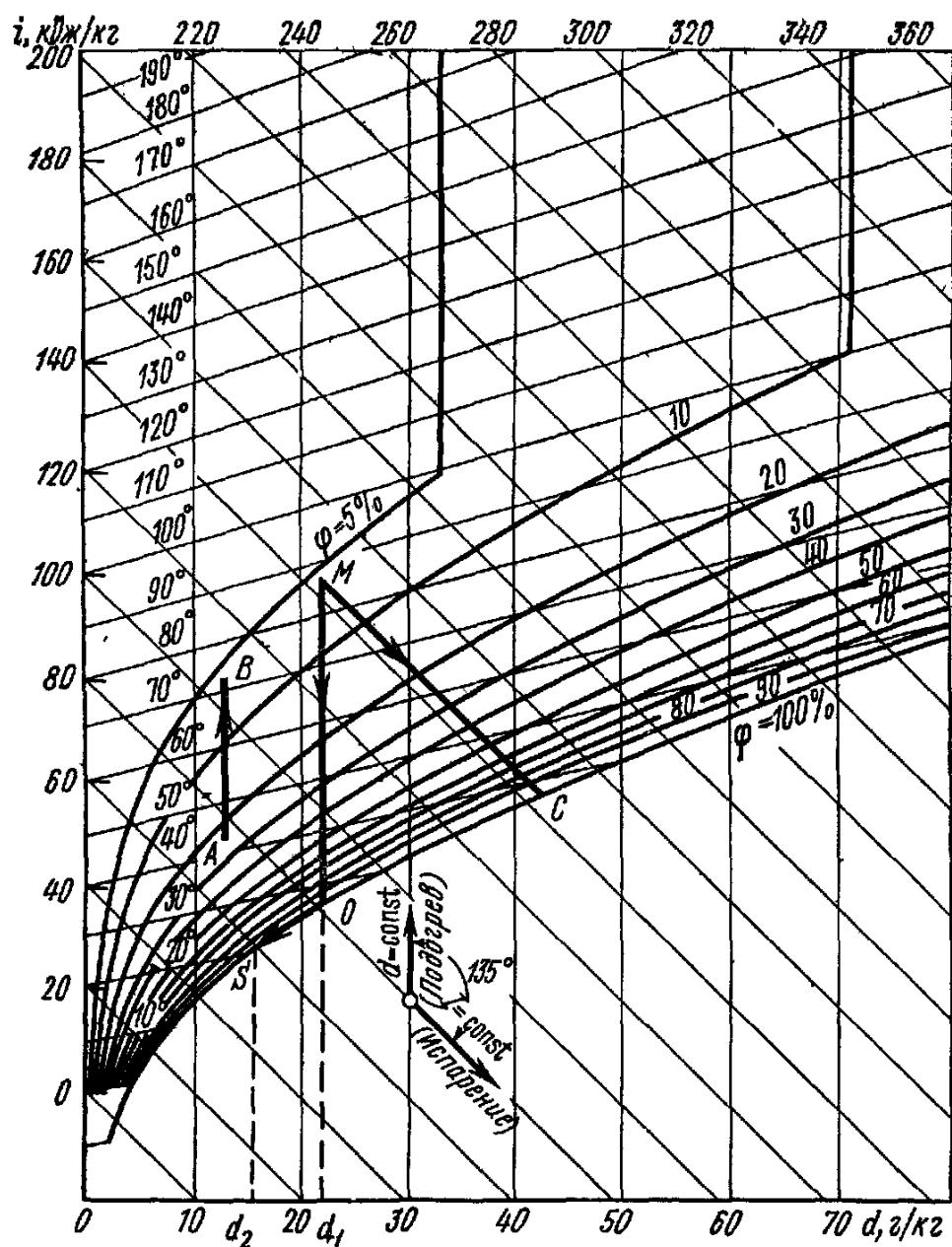




Малюнок 1.6.12-TS-діаграма водяного пару



Малюнок 1.6.13-is-діаграма водяного пару



Малюнок 1.6.14-іd-діаграма водяного пару

### 1.7 Запитання для самоконтролю

1. Що називається абсолютною температурою?
2. Що називають рівнянням стану?
3. Що називають рівноважним процесом?
4. Що таке термодинамічний процес?
5. Що таке термодинамічна рівновага?
6. Поняття про ідеальний газ.
7. Рівняння Клапейрону для ідеального газу.
8. Чим відрізняється універсальна газова постійна від газової постійної?
9. Розмірність газової постійної та її фізична суть.
10. Закон Дальтону.
11. Що називають парціальним тиском?
12. Що називають приведеним об'ємом?
13. Що називають масовою та об'ємною долею газу?
14. Як визначити газову постійну суміші газів за масовими та об'ємними долями?
15. Що розуміється під внутрішньою енергією газу?
16. Від яких параметрів газу залежить його внутрішня енергія?
17. Як визначається робота розширення газу?
18. Чим зображається робота на  $PV$ -діаграмі процесу?
19. Перший закон термодинаміки.
20. Що таке ентальпія?
21. Фізична суть ентальпії.
22. Визначення теплоємності.
23. Чим відрізняється теплоємність при постійному тиску від теплоємності при постійному об'ємі?
24. Яка функція називається ентропією?
25. Що зображає площа під кривою процесу на  $TS$ -діаграмі?
26. Як графічно зображається на  $PV$ -діаграмі ізохора, ізобара, ізотерма та адіабата?
27. Написати рівняння основних процесів.
28. Написати формули для роботи розширення для кожного процесу.
29. Яке взаємне розташування ізотерми та адіабати на  $PV$ -діаграмі, якщо вони проведені із однієї точки при розширенні та при стисненні газу?
30. Другий закон термодинаміки.
31. Що називають термічним ККД?
32. Описати прямий цикл Карно.
33. Як визначається холодильний коефіцієнт?
34. Що називають кипінням, пароутворенням та випаровуванням?
35. Який пар називають вологим насиченим, сухим насиченим, перегрітим?
36. Що таке ступінь сухості?
37. Визначення теплоти пароутворення.
38.  $PV$ -,  $TS$ -,  $IS$ -діаграми водяного пару.
39. Потрійна точка води.

- 40.Рівняння першого закону термодинамики для потоку газу.
- 41.Які канали називають соплом та дифузором?
- 42.Рівняння нерозривності для потоку газу.
- 43.Як визначається швидкість витікання газу?
- 44.Як впливає профіль сопла на швидкість витікання газу?
- 45.Який процес називають дроселюванням і де він застосовується?
- 46.Ефект Джоуля-Томсона.
- 47.Зміна роботи пару при його дроселюванні.
- 48.Що називають вологим повітрям?
- 49.Абсолютна та відносна вологість.
- 50.Що таке вологозміст?
- 51.Як досягти точки роси?

### 1.8 Типові задачі із розв'язанням

**Задача 1.** Визначити абсолютний тиск у паровому котлі, якщо надлишковий тиск у котлі, визначений за манометром  $P_{\text{над}}=2500\text{кПа}$ , а барометричний тиск за барометром при температурі  $t_0=0^\circ\text{C}$   $P_0=765\text{ мм рт.ст.}$

**Розв'язання.** Абсолютний тиск у котлі

$$P_a = P_{\text{над}} + P_0 = 2500000 + (765 \cdot 133,32) = 2602000 \text{ Па} = 2602 \text{ кПа} (26,02\text{бар})$$

**Задача 2.** Визначити масу повітря у балоні ємністю 80л при  $t=37^\circ\text{C}$  та тиску на манометрі 1100кПа, тиск на барометрі 765мм рт.ст. при  $t_{\text{п}}=25^\circ\text{C}$ .

**Розв'язання.** Приведемо показники барометру до  $0^\circ\text{C}$ .

$$B_0 = B(1 - 0,000172t) = 765(1 - 0,000172 \cdot 25) = 761,7 \text{ мм рт.ст.}$$

або

$$B_0 = 761,7 \cdot 133,32 = 101550 \text{ Па} = 101,55 \text{ кПа} = P_0$$

Абсолютний тиск у балоні:

$$P = P_{\text{над}} + P_0 = 1100 + 101,55 = 1201,55 \text{ кПа}$$

Маса повітря у балоні:

$$m = PV/RT = 1201550 \cdot 0,08 / (287 \cdot 310) = 1,08 \text{ кг.}$$

**Задача 3.** Визначити газову постійну атмосферного повітря, яке складається по об'єму із 21% кисню  $\text{O}_2$  та 79% азоту  $\text{N}_2$  при нормальних фізичних умовах.

**Розв'язання.** Визначимо об'ємні долі кисню та азоту:

$$r_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot 21 = 0,21$$

$$r_{\text{N}_2} = 0,01 \cdot 79 = 0,79$$

Визначимо газову постійну повітря

$$R = \frac{1}{\sum \left( \frac{r_i}{R_i} \right)} = \frac{1}{\frac{r_{\text{O}_2}}{R_{\text{O}_2}} + \frac{r_{\text{N}_2}}{R_{\text{N}_2}}} = \frac{1}{\frac{0,21}{2598} + \frac{0,79}{2968}} = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K}),$$

де  $R_{O_2}$  та  $R_{N_2}$  -газові постійні кисню та азоту, взяли із таблиці 1.6.1.

**Задача 4.** Яку кількість теплоти необхідно підвести до повітря в закритому сосуді об'ємом  $V_1=0,5 \text{ м}^3$ , якщо початкова температура  $t_1=100^\circ\text{C}$ , тиск  $p_1=300 \text{ кПа}$ , а кінцева температура  $t_2=500^\circ\text{C}$ ? Визначити також масу повітря та кінцевий тиск.

**Розв'язання.** Масу повітря визначимо із рівняння стану:

$$m = PV/RT = 3000000,5/(287 \cdot 373) = 1,4 \text{ кг}$$

Питому теплоємність повітря визначимо за табл. 1.6.7.:

$$\begin{aligned} \bar{C}_V \Big|_{t_1}^{t_2} &= \left( \bar{C}_V \Big|_0^{t_2} - \bar{C}_V \Big|_0^{t_1} \right) / (t_2 - t_1) = \\ &= (0,7193 \cdot 500 - 0,6632 \cdot 100) / (500 - 100) = 0,733 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

Визначимо кількість підведеної теплоти

$$Q_V = m \bar{C}_V \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 1,4 \cdot 0,733 (500 - 100) = 412 \text{ кДж}.$$

Кінцевий тиск визначимо по закону Гей-Люсака:

$$P_2 = P_1 T_2 / T_1 = 300 \cdot 773 / 373 = 623 \text{ кПа}.$$

**Задача 5.** Сосуд ємністю  $V_1=200 \text{ л}$  містить кисень при абсолютному тиску  $P_1=1000 \text{ кПа}$  та температурі  $t_1=47^\circ\text{C}$ . Визначити масу кисню, кінцеву температуру, зміну ентропії та кількість теплоти, яку необхідно підвести, щоб підтримати тиск в процесі при постійному об'ємі до  $P_2=2000 \text{ кПа}$ . Питому теплоємність вважати величиною змінною.

**Розв'язання.**

Масу можна визначити за рівнянням Клапейрона:

$$m = P_1 V_1 / T_1 = 1000000 \cdot 0,2 / (259,8 \cdot 320) = 2,4 \text{ кг}$$

Кінцеву температуру визначимо із закону Шарля:

$$T_2 = T_1 P_2 / P_1 = 2000000 \cdot 320 / 1000000 = 640 \text{ K}$$

Необхідна кількість теплоти:

$$Q_V = \Delta U = m \left( \bar{C}_V \Big|_0^{t_2} - \bar{C}_V \Big|_0^{t_1} \right) = 2,4 (0,7 \cdot 367 - 0,66 \cdot 47) = 543 \text{ кДж}.$$

Зміна ентропії:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m C_V \ln \frac{T_2}{T_1} = 2,4 \cdot 0,707 \cdot \ln \frac{640}{320} = 1,12 \text{ кДж} / \text{K}$$

**Задача 6.** Визначити параметри вологого насиченого водяного пару при тиску  $2,0 \text{ МПа}$  та ступені сухості  $X=0,9$ .

**Розв'язання.** За таблицями 1.6.2 та 1.6.3 або за *IS*-діаграмою водяного пару (мал.1.6.14) знаходимо параметри води, що кипить, та сухого насиченого пару при  $P=2,0$  МПа

$$t_h = 212,37^\circ\text{C}; \quad r = 18507 \text{ кДж/кг}; \quad V' = 0,0011768 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V'' = 0,09961 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad i' = 9086 \text{ кДж/кг}; \quad i'' = 2799,2 \text{ кДж/кг};$$

$$S' = 2,4471 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}; \quad S'' = 6,3411 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

За цими даними визначимо параметри водяного пару

$$V_x = V'(1-X) + V''X = 0,0011768 \cdot 0,1 + 0,09961 \cdot 0,9 = 0,08977 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$i_x = i' + 2X = 9086 + 18907 \cdot 0,9 = 26102 \text{ кДж/кг};$$

$$\rho_x = \frac{1}{V_x} = \frac{1}{0,08977} = 11,16 \text{ кг/м}^3;$$

$$S_x = S' + rX/T_h = 2,4471 + (18907 \cdot 0,9)/485,52 = 5,949 \text{ кДж/кг}.$$

**Задача 7.** Із комбінованого сопла газової турбіни витікають продукти згорання під тиском  $P_2=1,3 \cdot 10^5$  Па. При вході до сопла тиск газів дорівнює  $P_1=10,0 \cdot 10^5$  Па при температурі  $1200\text{K}(927^\circ\text{C})$ . масові витрати газів  $m=0,8$  кг/с. Витікання вважати адіабатним, показник адіабати  $K=1,35$ . Визначити мінімальну та вихідну площу сопла, а також температуру газів на виході із сопла.

**Розв'язання.** Визначимо критичне відношення тисків:

$$\beta_K = \frac{P_K}{P_1} \left( \frac{1}{K} + 1 \right)^{K/(K-1)} = \left( \frac{2}{1,35} + 1 \right)^{1,35/(1,35-1)} = 0,537.$$

Визначимо відношення тисків:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1,3}{10} = 0,13 < \beta_K$$

Так як  $\beta < \beta_K$ , то необхідно використати сопло Лавалля. Визначимо швидкість газів:

$$\omega_K = \sqrt{2 \left[ \frac{K}{K+1} \right] R T_1} = \sqrt{2 \left[ \frac{1,35}{1,35+1} \right] 287 \cdot 1200} = 629 \text{ м/с}$$

Площа критичного розрізу сопла (мінімальна):

$$f_{\min} = \frac{m V_K}{\omega_K} = \frac{0,8 \cdot 0,546}{629} = 0,000694 \text{ м}^2 = 694 \text{ мм}^2$$

$$V_K = V_1 / \beta_K^{1/K} = 0,3444 / 0,537^{1/1,35} = 0,546 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

де

$$V_1 = RT_1 / P_1 = 287 \cdot 1200 / 10,0 \cdot 10^5 = 0,3444 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Діаметр критичного розрізу сопла:

$$d_K = \sqrt{f_{\min} / 0,785} = \sqrt{694 / 0,785} = 29,8 \text{ мм}.$$

Швидкість газів у вихідному розрізі сопла:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{в}} &= \sqrt{2[K/(K-1)]RT_1 \left(1 - \beta^{(K-1)/K}\right)} = \\ &= \sqrt{2[1,35/(1,35-1)]287 \cdot 1200 \left(1 - 0,13^{(1,35-1)/1,35}\right)} = 782 \text{ м/с} \end{aligned}$$

Площа вихідного отвору сопла:

$$f_{\text{в}} = \frac{m V_2}{\omega_{\text{в}}} = 0,8 \cdot 1,524 / 782 = 0,001559 \text{ м}^2 = 1559 \text{ мм}^2$$

Діаметр вихідного отвору сопла:

$$D = \sqrt{f_{\text{в}} / 0,785} = \sqrt{1559 / 0,785} = 44,6 \text{ мм}.$$

Температура газів при виході із сопла:

$$T_2 = P_2 V_2 / R = 1,3 \cdot 10^5 \cdot 1,524 / 287 = 693 \text{ К} = 420^\circ \text{С}.$$

### 1.9. Задачі для самостійного розв'язання.

**Задача 1.** Визначити масу повітря у кімнаті, яка має площу  $S=25 \text{ м}^2$ , висоту  $h=3,2 \text{ м}$ , температура повітря  $t=18^\circ \text{С}$ , барометричний тиск повітря  $B=745 \text{ мм.рт.ст.}$

**Задача 2.** В посуді ємністю  $V_1=200 \text{ л}$  знаходиться повітря під тиском  $P_1=1000 \text{ кПа}$  та температурі  $t=40^\circ \text{С}$ . Яку кількість тепла необхідно підвести, щоб підвищити тиск повітря до  $P_2=2100 \text{ кПа}$ .

**Задача 3.** Газова суміш складається із аргону  $m_1=10 \text{ кг}$  та кисню  $m_2=10 \text{ кг}$  під тиском  $P=0,3 \text{ МПа}$  та при температурі  $t=20^\circ \text{С}$ . Визначити питому газову постійну суміші та загальний об'єм суміші.

**Задача 4.** Надлишковий тиск в теплообміннику за пружинним манометром дорівнює  $P_{\text{над}}=1520 \text{ кПа}$ . Атмосферний тиск за ртутним барометром складає  $P_{\text{атм}}=770 \text{ мм.рт.ст.}$  Визначити абсолютний тиск в теплообміннику.

**Задача 5.** При постійних теплоємностях  $C_V$  та  $C_P$  визначити зміну ентропії  $1 \text{ кг}$  повітря у процесі його розширення, якщо початкові параметри:  $t_1=600^\circ \text{С}$ ;  $P_1=4000 \text{ кПа}$ ; кінцеві параметри:  $t_2=100^\circ \text{С}$ ;  $P_2=400 \text{ кПа}$ . Визначити також зміну ентропії при змінних теплоємностях.

*Задача 6.* В циліндрі двигуна ємністю  $V_1=500\text{л}$  знаходиться газ (із властивостями повітря) під надлишковим тиском  $P_{\text{над}}=3900\text{ кПа}$  та при температурі  $t_1=1500^\circ\text{C}$ . Атмосферний тиск  $P_{\text{атм}}=100\text{ кПа}$ . Від газу відбирають кількість теплоти при постійному тиску до зниження його температури до  $t_2=200^\circ\text{C}$ . Визначити масу газу, кінцевий об'єм, зміну внутрішньої енергії, кількість відібраної теплоти, виконану роботу стиснення газу та зміну ентропії.

*Задача 7.* Повітря масою  $10\text{ кг}$  розширюється ізотермно при  $t_1=400^\circ\text{C}$  від початкового тиску  $P_1=800\text{ кПа}$  до кінцевого об'єму  $V_2=5\text{ м}^3$ . Визначити початковий об'єм, кінцевий тиск, роботу розширення, зміну ентропії, ентальпії та внутрішньої енергії.

*Задача 8.* В компресор газотурбінної установки поступає  $5\text{ кг}$  повітря із початковими параметрами :  $P_1=100\text{ кПа}$  та  $t_1=27^\circ\text{C}$ . Повітря стискується адіабатно до тиску  $P_2=4000\text{ кПа}$ . Визначити початковий та кінцевий об'єми, кінцеву температуру, роботу стиснення, зміну внутрішньої енергії та ентропії. Показник адіабати для ідеального газу  $K=1,4$ .

*Задача 9.* Визначити стан водяного пару, якщо дано:

- 1)  $P=1,0\text{ МПа}$ ;  $v=0,17\text{ м}^3/\text{кг}$ ;
- 2)  $P=1,2\text{ МПа}$ ;  $t=200^\circ\text{C}$ .

*Задача 10.* Визначити масу та ентальпію  $0,5\text{ м}^3$  вологого пару із ступенем вологості  $10\%$  та тиском  $1,0\text{ МПа}$ .

*Задача 11.* Визначити витрати кількості теплоти в паронагрівачеві на  $1\text{ кг}$  пару, якщо параметри на вході:  $P_1=8,0\text{ МПа}$ ;  $X_1=0,95$ ; на виході:  $P_2=8,0\text{ МПа}$ ;  $t_2=200^\circ\text{C}$ .

*Задача 12.* Перегрітий пар розширюється в комбінованому соплі Лавалля від початкових параметрів: тиску  $15\cdot 10^5\text{ Па}$  та температури  $300^\circ\text{C}$  до тиску середовища, рівного  $0,5\cdot 10^5\text{ Па}$ . Визначити стан та швидкість пару в кінці процесу, а також основні розміри сопла, якщо коефіцієнт втрат енергії  $\varphi=0,11$ , а масові витрати пару  $m=2,5\text{ кг/с}$ , кут конусності сопла  $\Omega=10^\circ$ .

*Задача 13.* Маємо  $1\text{ кг}$  перегрітого водяного пару із тиском  $P_1=10\text{ МПа}$  та  $t_1=530^\circ\text{C}$ . В першому випадку при цих параметрах пар поступає до парової турбіни, де адіабатно розширюється до кінцевого тиску  $P_2=0,005\text{ МПа}$ . В другому випадку пар спочатку дроселюється у вентилі до проміжного тиску  $P_1=0,3\text{ МПа}$ , а потім адіабатно розширяється в паровій турбині до того ж кінцевого тиску. Визначити температуру пару за вентилем, зміну ентропії та втрати корисної роботи внаслідок дроселювання.



## 2 Прикладна термодинаміка

### 2.1 Реферат

Компресори, принцип дії. Цикли одноступеневого та багатоступеневого поршньового компресору. Класифікація двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Цикл ДВЗ з підводом теплоти в процесі  $V=\text{const}$ . Цикл ДВЗ з підводом теплоти в процесі  $P=\text{const}$ . Цикл ДВЗ з підводом теплоти в процесі  $V=\text{const}$  та  $P=\text{const}$ . Порівняння циклів ДВЗ.

Газотурбінні установки (ГТУ). Цикл ГТУ із підводом теплоти в процесі  $P=\text{const}$ . Цикл ГТУ із підводом теплоти в процесі  $V=\text{const}$ . Порівняння циклів ГТУ. Методи підвищення ККД ГТУ. Цикли реактивних двигунів.

Цикл Карно для водяного пару. Цикл Ренкіна для паротурбінної установки. Вплив основних параметрів на ККД циклу Ренкіна.

Основні поняття про роботу холодильних установок. Цикли повітряних холодильних установок. Цикл парової компресорної холодильної установки. Глибоке охолодження.

### 2.2 Терміни, позначення

Термін	Літерне позначення	Одиниця виміру
Технічна робота компресору	$l$	Дж/кг
Об'ємний коефіцієнт корисної дії компресору	$\eta_{об}$	%
Шкідливий простір компресору	$V_{шк}$	м <sup>3</sup>
Потужність на привід компресору	$N_e$	Вт
Об'ємна подача компресору	$V_n$	м <sup>3</sup> /с
Ступінь стиснення повітря	$X$	-
Термічний ККД циклу	$\eta_t$	%
Ступінь стиснення газів у ДВЗ	$\varepsilon$	-
Ступінь підвищення тиску у ДВЗ	$\lambda$	-
Ступінь попереднього розширення газів у ДВЗ	$\rho$	-
Кількість підведеної теплоти	$q_1$	Дж/кг
Кількість відведеної теплоти	$q_2$	Дж/кг
Ступінь підвищення тиску повітря в ГТУ	$\beta$	-
Ступінь додаткового підвищення тиску в ГТУ	$\lambda$	-
Холодильний коефіцієнт циклу	$\varepsilon$	-
Ступінь ізобарного розширення в ГТУ	$\rho$	-

### 2.3 Поняття, визначення

Технічна робота компресору- робота, яка втрачається на одержання 1кг стисненого газу.

Компресор- машина, яка призначена для стиснення різноманітних газів.

Всмоктування- процес надходження газу до циліндру компресора.

Стиснення- процес зменшення об'єму газу в циліндрі компресора за рахунок переміщення поршню.

Нагнітання- процес подачі стисненого газу із циліндра компресора до газової магістралі.

Об'ємний коефіцієнт корисної дії компресору- відношення об'єму газу, який подано до циліндру, до повного об'єму циліндру.

Шкідливий простір компресору- вільний об'єм між кришкою циліндру та поршнем при його крайньому положенні під час виштовхування стисненого газу.

Потужність на привід компресору- робота, яку витратили при політропному стисненні газу, із урахуванням подачі компресору та коефіцієнту корисної дії.

Об'ємна подача компресору- об'єм газу, який подається компресором до магістралі при нормальних умовах.

Ступінь стиснення повітря- відношення тиску на виході компресору до тиску на вході компресору.

Багатоступеневе стиснення газу- стиснення газу в декількох циліндрах із проміжним охолодженням газу після кожної ступені стиснення.

Термічний ККД циклу- відношення кількості теплоти, яка перетворилась в корисну роботу, до загальної кількості теплоти, яка була підведена до робочого тіла.

Ступінь стиснення газів у ДВЗ- відношення об'єму газу в кінці стиснення до початкового об'єму газу.

Ступінь підвищення тиску у ДВЗ- відношення тиску газу в кінці стиснення до початкового тиску газу.

Ступінь попереднього розширення газів у ДВЗ- попереднє розширення газів при підводі теплоти до газу.

Кількість підведеної теплоти- теплота, яку підвели до робочого тіла в процесах  $P=\text{const}$ ,  $V=\text{const}$  або  $P=\text{const}$  і  $V=\text{const}$ .

Кількість відведеної теплоти- теплота, яку в циклі відвели до теплоприймача.

Індикаторна діаграма ДВЗ- зміна тиску в циліндрі двигуна в залежності від положення поршню за весь цикл.

Чотирьохтактний двигун- двигун, в якому робочий процес виконується за чотири ходи (такти) поршню.

Ступінь підвищення тиску повітря в ГТУ- відношення кінцевого тиску повітря в компресорі до початкового тиску повітря на вході до компресору.

Ступінь додаткового підвищення тиску в ГТУ- відношення тиску газів в кінці процесу підведення теплоти до тиску газів після компресору.

Ступінь ізобарного розширення в ГТУ- відношення об'єму газу в кінці процесу підведення теплоти до об'єму газу при подачі його до камери згорання.

Холодильний коефіцієнт циклу- відношення теплоти, яку відібрали від тіл, що охолоджуються, до витраченої на цей процес роботи.

## 2.4 Основні формули

Технічна робота компресору:

$$\ell = -\int_1^2 V dP = -(i_2 - i_1 - q_d)$$

Об'ємний коефіцієнт корисної дії компресору:

$$\eta_{об} = \frac{V}{V_h}$$

Потужність на привід компресору:

$$N_\ell = \ln m / (\eta_n \eta_{мех} \eta_{нап})$$

Ступінь стиснення повітря у компресорі:

$$X = \frac{P_2}{P_1} = \sqrt[z]{P_z / P_1}$$

Термічний ККД циклу:

$$\eta_t = \frac{q_2 - q_1}{q_1} = 1 - \left( q_2 / q_1 \right)$$

Ступінь стиснення газів у ДВЗ:

$$\varepsilon = V_1 / V_2$$

Ступінь підвищення тиску у ДВЗ:

$$\lambda = P_3 / P_2$$

Ступінь попереднього розширення газів у ДВЗ:

$$\rho = V_3 / V_2$$

Кількість підведеної теплоти у ДВЗ:

$$q_1 = C_V (T_3 - T_2) = C_P (T_3 - T_2) = C_V (T_3 - T_2) + C_P (T_4 - T_3)$$

Кількість відведеної теплоти у ДВЗ:

$$q_2 = C_V (T_4 - T_1) = C_V (T_5 - T_1)$$

Ступінь підвищення тиску у ГТУ:

$$\beta = P_2 / P_1$$

Ступінь ізобарного розширення в ГТУ:

$$\rho = V_3 / V_2$$

Ступінь додаткового підвищення тиску в ГТУ:

$$\lambda = P_3 / P_2$$

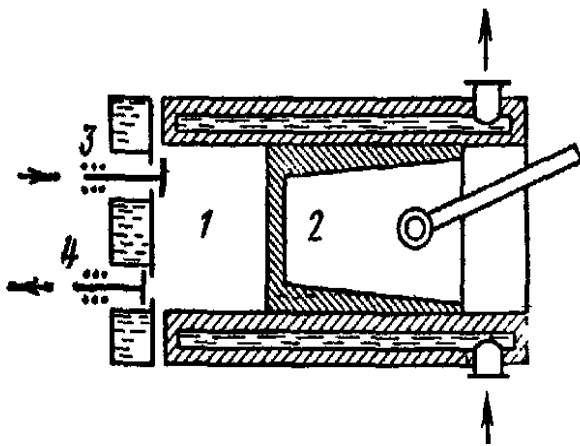
Холодильний коефіцієнт циклу:

$$\varepsilon = q_2 / \ell$$

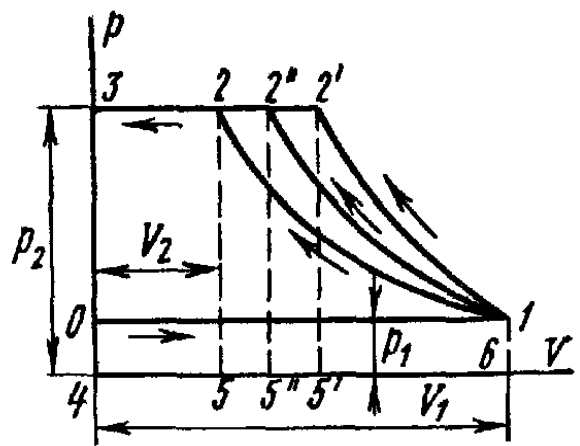
Термічний ККД циклу Ренкіна:

$$\eta_t = (i_1 - i_2) / (i_1 - i_{2'})$$

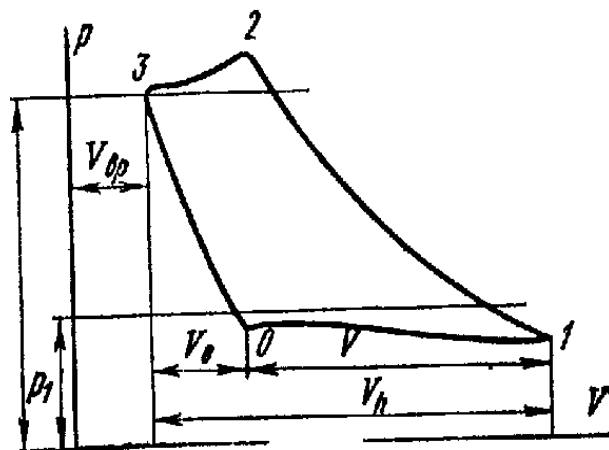
## 2.5 Малюнки, графіки, таблиці



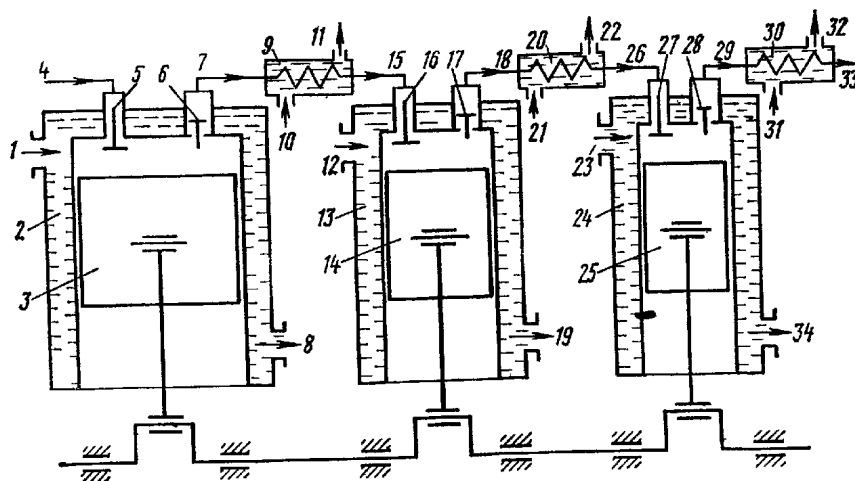
Малюнок 2.5.1-Схема одноступеневого поршньового компресору



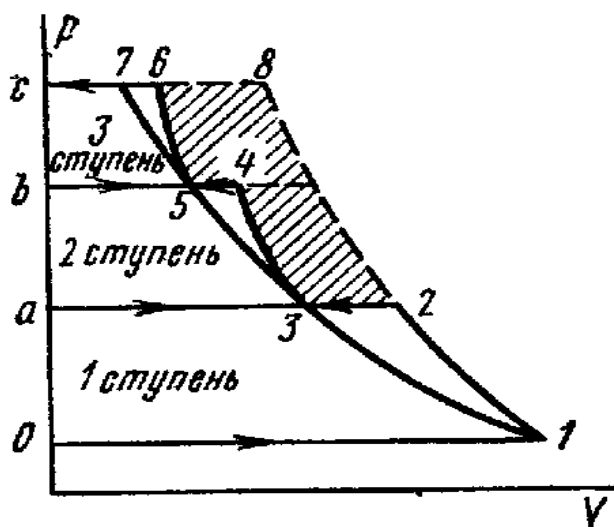
Малюнок 2.5.2-Цикл ідеального поршньового компресору



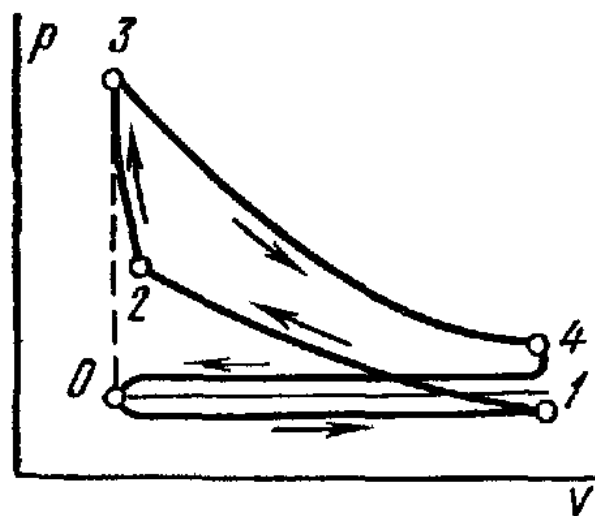
Малюнок 2.5.3-Цикл реального поршньового компресору



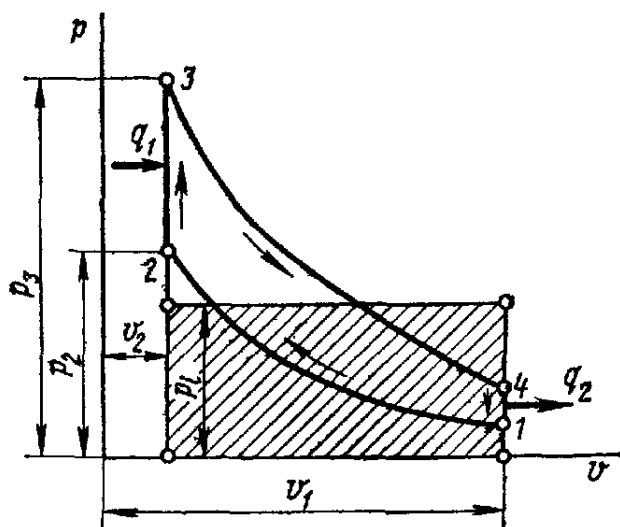
Малюнок 2.5.4-Схема багатоступеневого поршньового компресору



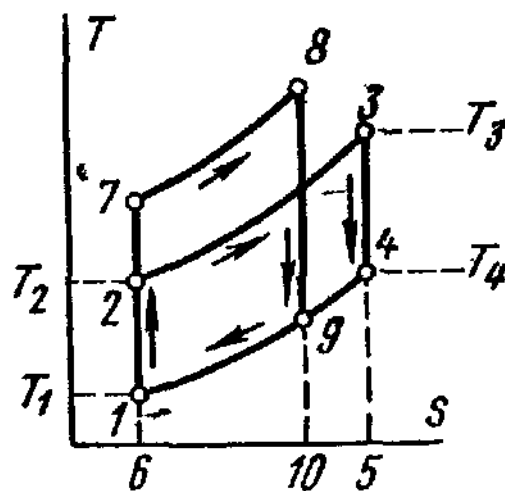
Малюнок 2.5.5-Цикл багатоступеневого компресору



Малюнок 2.5.6-Індикаторна діаграма ДВЗ



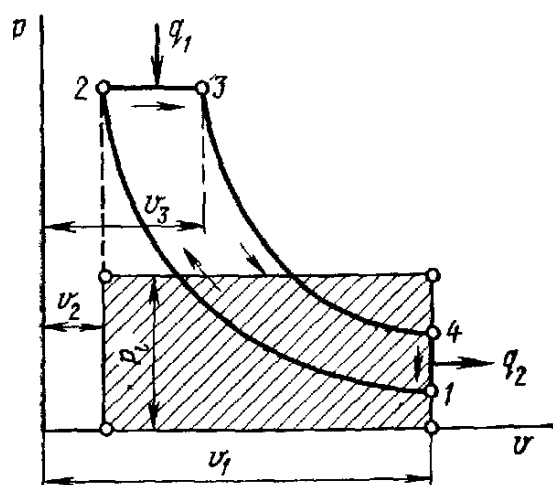
Малюнок 2.5.7-Цикл ДВЗ із  $V=\text{const}$  на PV-діаграмі



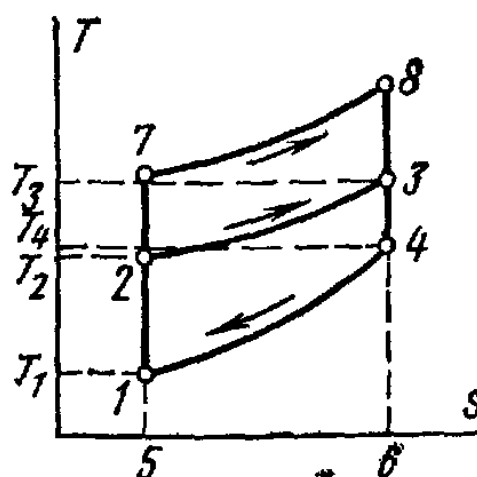
Малюнок 2.5.8- Цикл ДВЗ із  $V=\text{const}$  на TS-діаграмі

Таблиця 2.5.9-Залежність ККД від ступені стиснення

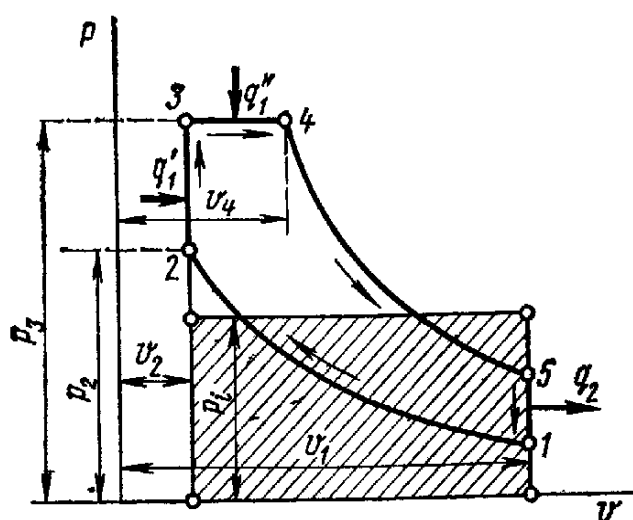
$\varepsilon$	$\eta_t$		$\varepsilon$	$\eta_t$	
	при $k=1,35$	при $k=1,4$		при $k=1,35$	при $k=1,4$
3	32,0	36,0	7	49,4	55,0
4	38,0	43,0	8	51,7	57,0
5	42,5	47,5	10	55,2	61,5
6	46,5	51,5			



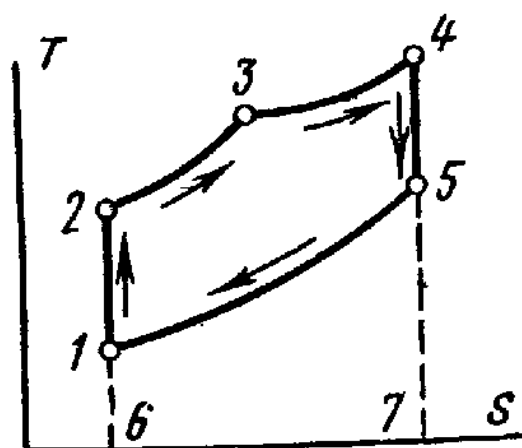
Малюнок 2.5.10-Цикл ДВЗ із  $P=\text{const}$  на  $PV$ -діаграмі



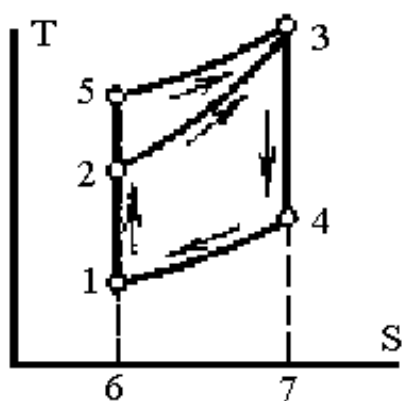
Малюнок 2.5.11-Цикл ДВЗ із  $P=\text{const}$  на  $TS$ -діаграмі



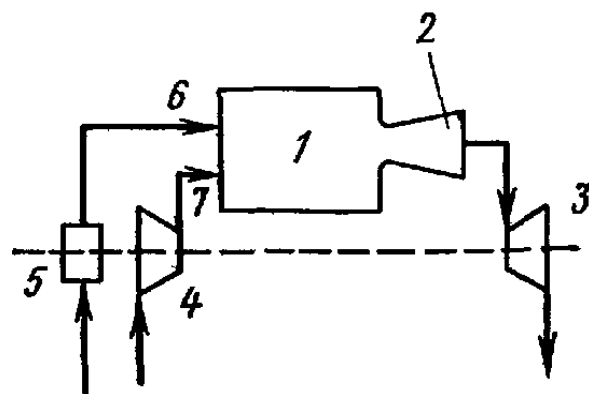
Малюнок 2.5.12-Цикл ДВЗ із  $V=\text{const}$  та  $P=\text{const}$  на  $PV$ -діаграмі



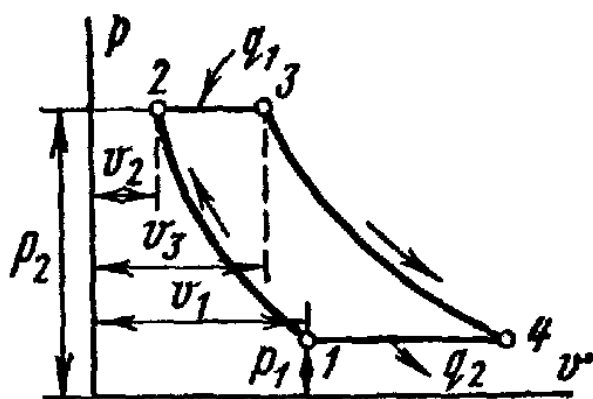
Малюнок 2.5.13-Цикл ДВЗ із  $V=\text{const}$  та  $P=\text{const}$  на  $TS$ -діаграмі



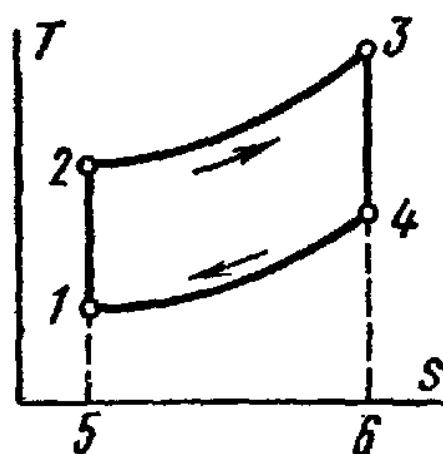
Малюнок 2.5.14-Порівняння циклів ДВЗ



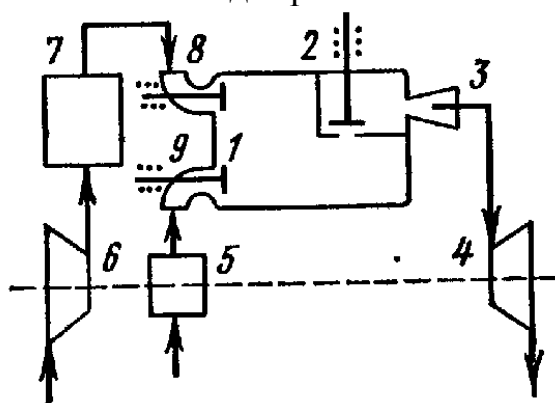
Малюнок 2.5.15-Схема ГТУ із підводом теплоти при  $P=\text{const}$



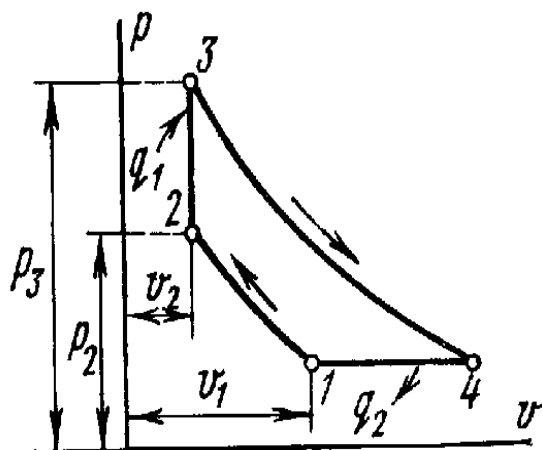
Малюнок 2.5.16-Цикл ГТУ із  $P=\text{const}$  на PV-діаграмі



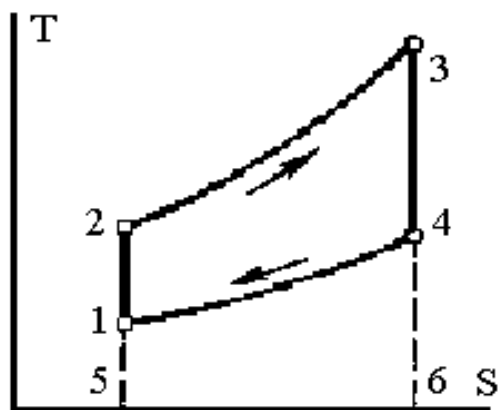
Малюнок 2.5.17-Цикл ГТУ із  $P=\text{const}$  на TS-діаграмі



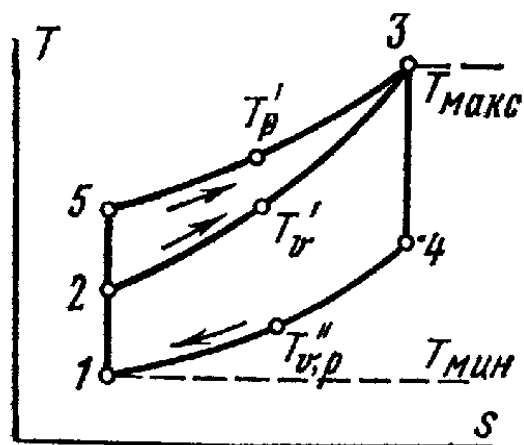
Малюнок 2.5.18-Схема ГТУ із підводом теплоти при  $V=\text{const}$



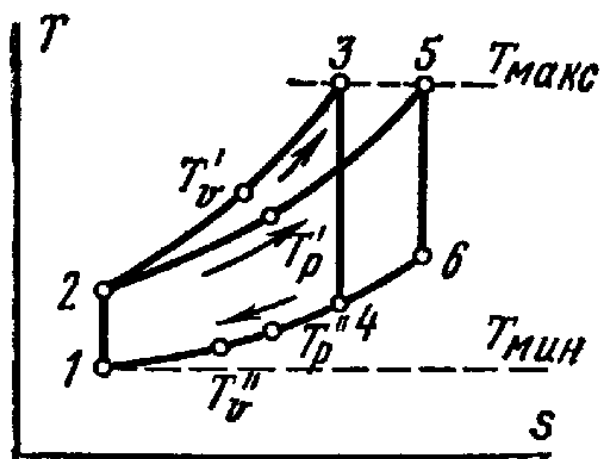
Малюнок 2.5.19-Цикл ГТУ із  $V=\text{const}$  на PV-діаграмі



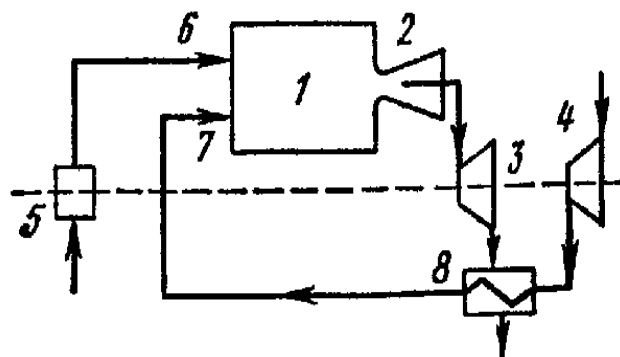
Малюнок 2.5.20-Цикл ГТУ із  $U=\text{const}$  на TS-діаграмі



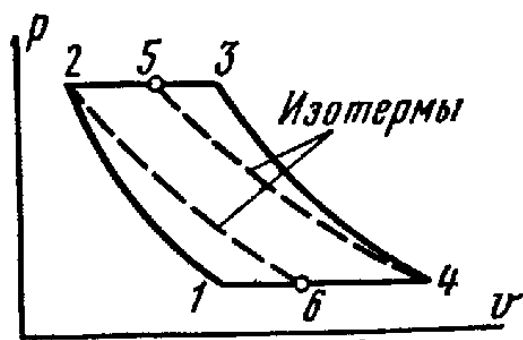
Малюнок 2.5.21-Порівняння циклів ГТУ при рівних тисках



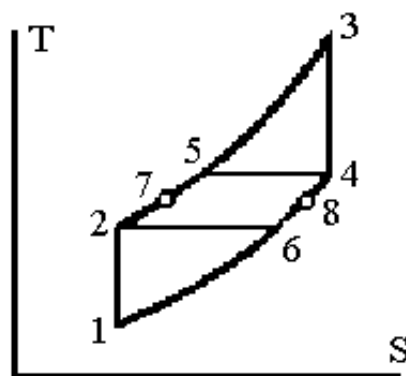
Малюнок 2.5.22-Порівняння циклів ГТУ при рівних максимальних температурах



Малюнок 2.5.23-Схема ГТУ із регенерацією теплоти

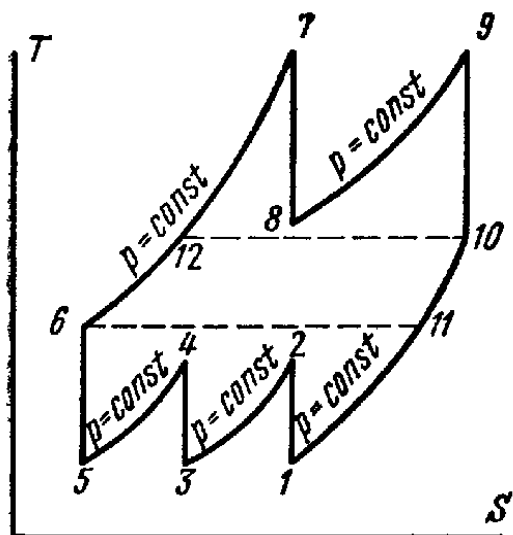


Малюнок 2.5.24-Цикл ГТУ із регенерацією теплоти на PV-діаграмі

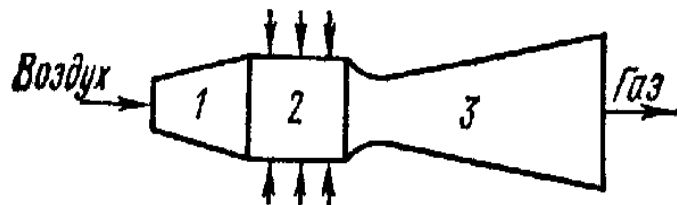


Малюнок 2.5.25-Цикл ГТУ із регенерацією теплоти на TS-діаграмі

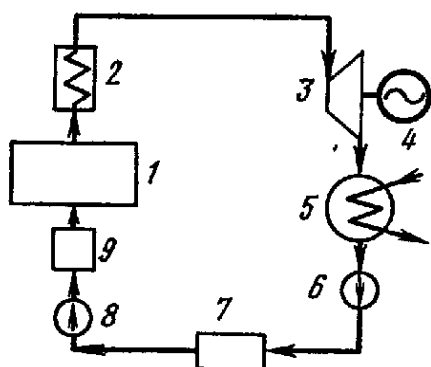




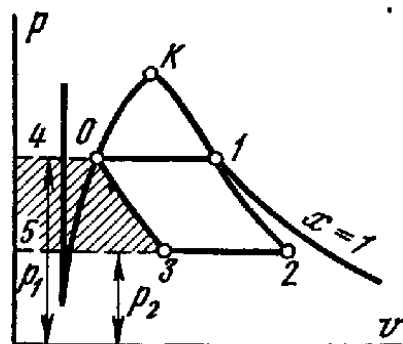
Малюнок 2.5.26-Цикл багатоступеневої ГТУ на TS-діаграмі



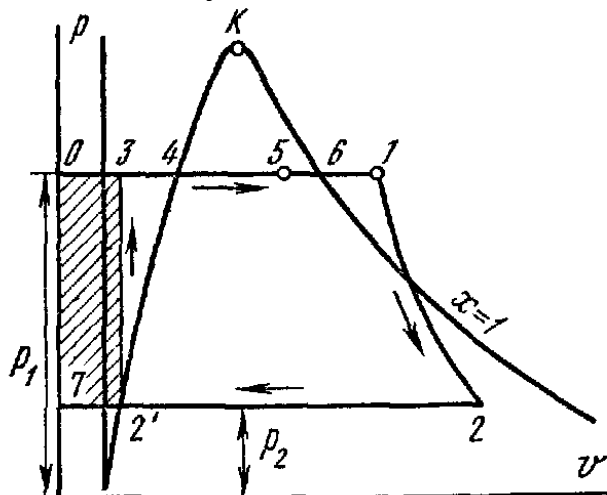
Малюнок 2.5.27-Схема реактивного двигуна



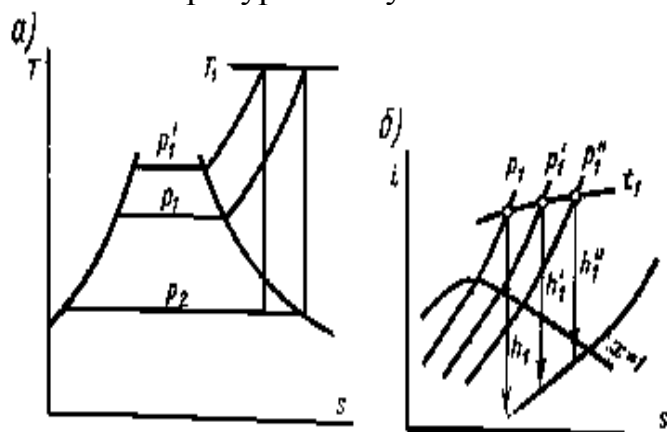
Малюнок 2.5.28 Схема паротурбінної установки



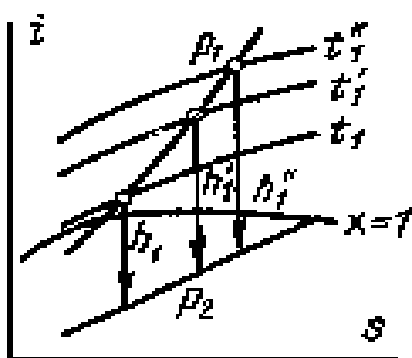
Малюнок 2.5.29-Цикл Карно для паротурбінної установки



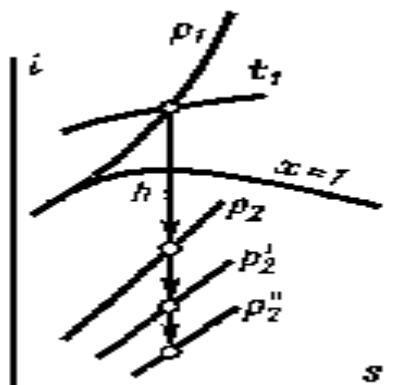
Малюнок 2.5.30-Цикл Рекіна для паротурбінної установки



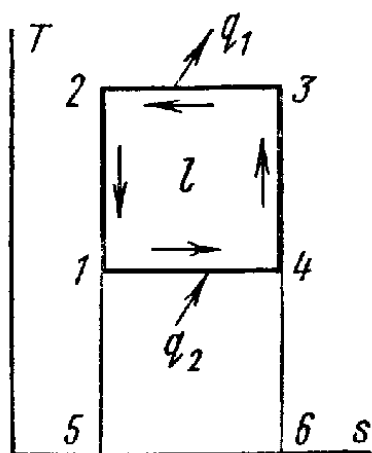
Малюнок 2.5.31-Вплив початкового тиску пару на роботу установки



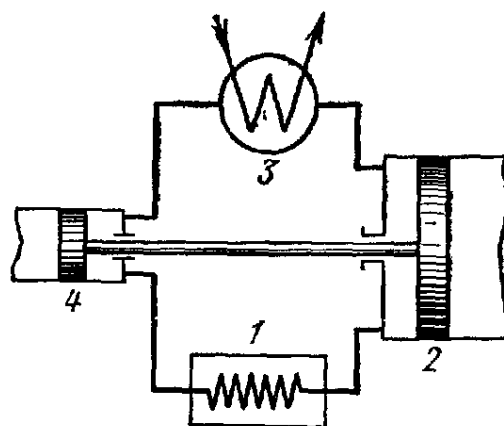
Малюнок 2.5.32- Вплив початкової температури пару на роботу установки



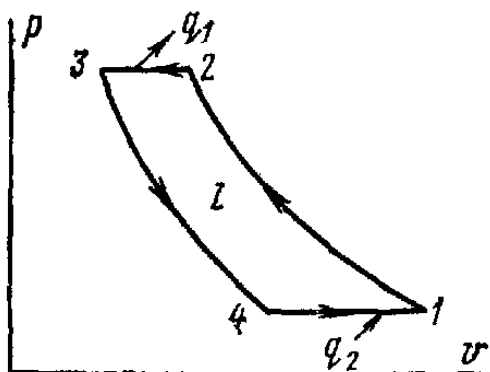
Малюнок 2.5.33- Вплив кінцевого тиску пару в конденсаторі на роботу установки



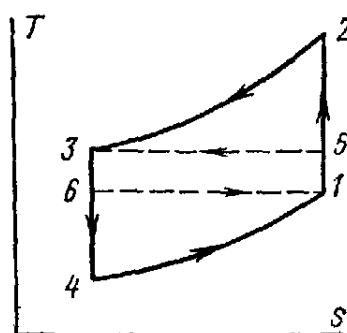
Малюнок 2.5.34-Холодний цикл на TS-діаграмі



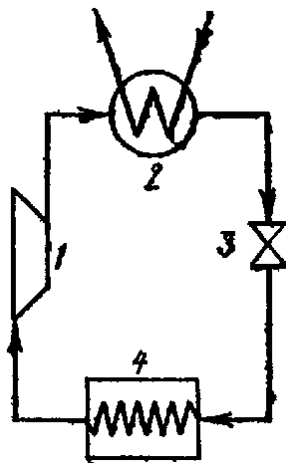
Малюнок 2.5.35-Схема повітряної холодильної установки



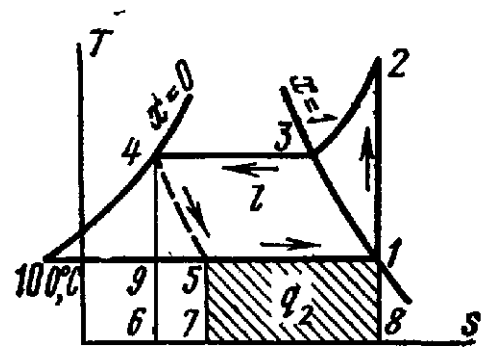
Малюнок 2.5.36-Цикл повітряної холодильної установки на PV-діаграмі



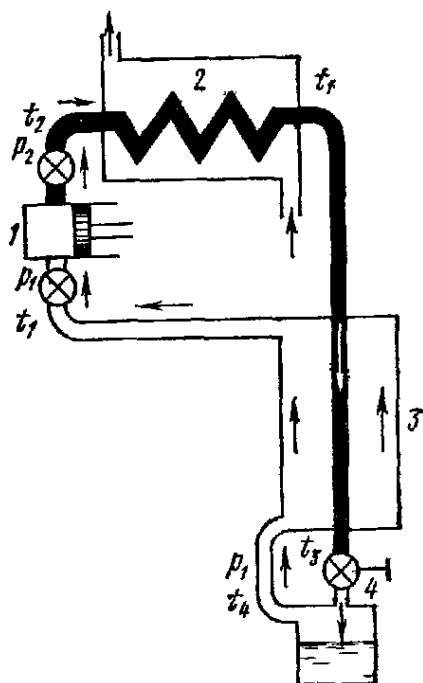
Малюнок 2.5.37-Цикл повітряної холодильної установки на TS-діаграмі



Малюнок 2.5.38-Схема парової конденсаторної холодильної установки



Малюнок 2.5.39-Цикл парової конденсаторної холодильної установки



Малюнок 2.5.40-Схема становки для глибокого охолодження

## 2.6 Запитання та завдання для самоконтролю

1. Яка машина називається компресором?
2. Дайте опис конструкції одноступеневого компресора.
3. Теоретична індикаторна діаграма одноступеневого компресора.
4. Який процес стиснення є найбільш економічним?
5. Чим відрізняється дійсна індикаторна діаграма компресору від теоретичної?
6. Що таке шкідливий простір?
7. До якого тиску використовують одноступеневий компресор?
8. Принцип дії багатоступеневого компресору.
9. На які групи розділяють поршньові двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ)?
10. Дайте опис ідеального циклу ДВЗ із  $V = \text{const}$ .
11. Дайте опис ідеального циклу ДВЗ із  $P = \text{const}$ .
12. Порівняйте цикл ДВЗ із  $V = \text{const}$  із циклом при  $P = \text{const}$ .
13. Які причини створення ДВЗ із змішаним підводом тепла?
14. Основні характеристики ДВЗ.
15. За рахунок чого запалюється паливна суміш у ДВЗ різних груп?
16. Основні недоліки поршньових ДВЗ.
17. Переваги газотурбинних установок (ГТУ) перед ДВЗ.
18. Опишіть ідеальний цикл ГТУ із  $P = \text{const}$ .
19. Опишіть ідеальний цикл ГТУ із  $V = \text{const}$ .
20. Порівняйте цикли ГТУ із  $P = \text{const}$  та  $V = \text{const}$ .
21. Які методи використовують для підвищення ККД ГТУ?
22. Опишіть ідеальні цикли реактивних двигунів.
23. Чим відрізняється паротурбінна установка (ПТУ) від ДВЗ?
24. Опишіть цикл Карно для насиченого пару.
25. Чим відрізняється цикл Ренкіна від циклу Карно?
26. Як впливає початковий тиск пару на ККД циклу Ренкіна?
27. Поясніть вплив початкової температури на ККД циклу Ренкіна.
28. Чому обмежується кінцевий тиск пару в конденсаторі в циклі Ренкіна?
29. На які групи діляться холодильні установки?
30. Що таке холодильний коефіцієнт?
31. Опишіть повітряну холодильну установку та її недоліки.
32. Опишіть парову компресорну холодильну установку та її недоліки.
33. Опишіть цикл глибокого охолодження.

## 2.7 Типові задачі із розв'язанням

**Задача 1.** Визначити теоретичну роботу на привід одноступеневого компресору при стисненні повітря до тиску 12,5 МПа. Початковий тиск 0,1 МПа, початкова температура 300°С. показник політропи прийняти рівним  $n=1,2$ , об'єм повітря 1 м<sup>3</sup>. Визначити також температуру повітря в кінці стиснення.

**Розв'язання.** Роботу на привід компресору визначимо за рівнянням:

$$L_K = -\frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = -\frac{1,2}{1,2-1} 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1 \left[ \left( \frac{12,5}{0,1} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right] =$$

$$-0,6 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3 = -74,4 \text{ кДж/м}^3$$

Температура в кінці стиснення:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{h-1}{h}}; T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{h-1}{h}} = (300 + 273) \left( \frac{12,5}{0,1} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 573 \cdot 2,24 = 1284 \text{ K}$$

**Задача 2.** Для ідеального циклу поршньового двигуна із підводом теплоти при  $V=\text{const}$  визначити параметри усіх точок та корисну питому роботу. Дано:  $P_1=0,1\text{МПа}$ ;  $T_1=320\text{К}$ ;  $\varepsilon=4,0$ ;  $R=287 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$ ;  $\kappa=1,4$ .

**Розв'язання.**

Параметри точки 1:

$$P_1 = 0,1 \text{ МПа}; T_1 = 320 \text{ К};$$

$$V_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 320}{0,1 \cdot 10^6} = 0,92 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Параметри точки 2:

$$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = \frac{0,92}{4} = 0,23 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\kappa = \varepsilon^\kappa; P_2 = P_1 \cdot \varepsilon^\kappa = 0,1 \cdot 4,0^{1,4} = 0,738 \text{ МПа}$$

Параметри точки 3:

$$V_3 = V_2 = 0,23 \text{ м}^3/\text{кг}; P_3 = P_2 \cdot \lambda = 0,738 \cdot 4 = 2,96 \text{ МПа};$$

$$T_3 = T_2 \cdot \lambda = 592 \cdot 4 = 2368 \text{ К}.$$

Параметри точки 4:

$$V_4 = V_1 = 0,92 \text{ м}^3/\text{кг}; \frac{T_4}{T_3} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^{\kappa-1}; T_4 = T_3 \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^{\kappa-1} = 2368 \left( \frac{0,23}{0,92} \right)^{1,4-1} = 1340 \text{ К};$$

$$P_4 = \frac{RT_4}{V_4} = \frac{287 \cdot 1340}{0,92} = 417000 \text{ МПа}.$$

Корисна питома робота:

$$\ell = \ell_1 - \ell_2 = \left[ \frac{1}{\kappa-1} \right] (P_3 V_3 - P_4 V_4) - \left[ \frac{1}{\kappa-1} \right] (P_1 V_1 - P_2 V_2) =$$

$$\left[ \frac{1}{(1,4-1)} \right] (2,96 \cdot 10^6 \cdot 0,23 - 0,417 \cdot 10^6 \cdot 0,92) + \left[ \frac{1}{(1,4-1)} \right] (0,1 \cdot 0,92 - 0,738 \cdot 0,23) \cdot 10^6 =$$

$$742000 - 195000 = 547000 \text{ Дж/кг}.$$

**Задача 3.** Для ідеального циклу ГТУ із підводом теплоти при  $P=\text{const}$  визначити параметри характерних точок та корисну питому роботу, термічний

ККД циклу. Початкові параметри робочого тіла:  $P_1=0,1\text{МПа}$ ;  $T_1=300\text{К}$ ;  $\beta=P_2/P_1=10$ ;  $K=1,4$ ;  $T_3\leq 1000\text{К}$ .

**Розв'язання.** Параметри точки 1:

$$P_1 = 0,1\text{МПа}, T_1 = 300\text{К};$$

$$V_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 300}{0,1 \cdot 10^6} = 0,86 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Параметри точки 2:

$$P_2 = P_1 \cdot \beta = 0,1 \cdot 10 = 1,0\text{МПа};$$

$$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = \frac{0,92}{4} = 0,23 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}}; T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} = 300 \left( \frac{1,0}{0,1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 580\text{К};$$

$$V_2 = \frac{RT_2}{P_2} = \frac{287 \cdot 580}{1,0 \cdot 10^6} = 0,1665 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Параметри точки 3:

$$P_3 = P_2 = 1,0\text{МПа}, T_3 = 1000\text{К};$$

$$V_3 = \frac{RT_3}{P_3} = \frac{287 \cdot 1000}{1,0 \cdot 10^6} = 0,287 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Параметри точки 4:

$$P_4 = P_1 = 0,1\text{МПа}, \frac{V_4}{V_3} = \left( \frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1}{K}};$$

$$V_4 = V_3 \left( \frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1}{K}} = 0,287 \left( \frac{1,0}{0,1} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 1,488 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$T_4 = \frac{P_4 V_4}{R} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,488}{287} = 518\text{К}.$$

Корисна питома робота:

$$\begin{aligned} \ell &= \ell_2 - \ell_1 = P_2(V_3 - V_2) + \left[ \frac{1}{(K-1)} \right] (P_3 V_3 - P_4 V_4) - P_1(V_4 - V_1) - \left[ \frac{1}{(K-1)} \right] (P_2 V_2 - P_1 V_1) = \\ &= 1,0 \cdot 10^6 \cdot (0,287 - 0,1665) + \left[ \frac{1}{(1,4-1)} \right] (1,0 \cdot 0,287 - 1,488 \cdot 0,1) \cdot 10^6 - \\ &- 0,1 \cdot 10^6 \cdot (1,488 - 0,86) - \left[ \frac{1}{(1,4-1)} \right] (1,0 \cdot 0,1665 - 0,86 \cdot 0,1) \cdot 10^6 = \\ &= 486500 - 263500 = 203000 \text{ Дж} / \text{кг} = 203 \text{ кДж} / \text{кг}. \end{aligned}$$

Термічний ККД циклу:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{K-1}{K}}} = 1 - \frac{1}{10^{\frac{1,4-1}{1,4}}} = 0,482.$$

**Задача 4.** Визначити ККД ідеального циклу Ренкіна при початковій температурі пару  $t_1=500^\circ\text{C}$ , кінцевому тиску  $P_2=0,01\text{МПа}$ , початковому тиску  $P_1=2,0\text{МПа}$ .

**Розв'язання.** Термічний ККД циклу:

$$\eta_t = (i_1 - i_2) / (i_1 - i_2')$$

із таблиці водяного пару або IS-діаграми водяного пару знаходимо:

$$i_1=3470\text{кДж/кг}; i_2=2360\text{кДж/кг}; i_2'=192\text{кДж/кг}.$$

$$\eta_t = (3470 - 2360) / (3470 - 192) = 0,34.$$

**Задача 5.** Розрахувати повітряну холодильну установку при таких умовах. Повітря поступає до холодильної камери під тиском  $P_1=0,1\text{МПа}$  та температурі  $t_1=-15^\circ\text{C}$ , в компресорі повітря стискається по адіабаті до  $P_2=0,4\text{МПа}$ , а потім поступає до охолоджувача, де при  $P=\text{const}$  зменшує свою температуру до  $t_3=10^\circ\text{C}$ . В турбодетандері повітря розширюється адіабатно до початкового тиску, після чого направляється до холодильної камери.

Визначити температуру повітря під час подачі до холодильної камери, роботу циклу та холодильний коефіцієнт.

**Розв'язання.** Температуру повітря  $T_4$  на вході до холодильної камери визначаємо із адіабатного процесу 3-4:

$$T_4/T_3 = (P_4/P_3)^{\frac{K-1}{K}}; T_4 = T_3 \left( \frac{P_1/P_2}{P_2/P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} = 283 \left( \frac{0,1/0,4}{0,4/0,1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 191\text{K}.$$

Робота циклу:

$$\ell_0 = \ell_K - \ell_{T0} = 127 - 93 = 34,4\text{кДж/кг}.$$

Робота компресору:

$$\ell_K = \bar{C}_P (T_2 - T_1) = 1,012(384 - 258) = 127,4\text{кДж/кг}.$$

Температура повітря після компресору:

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{\frac{K-1}{K}}; T_2 = T_1 \left( \frac{P_2/P_1}{P_1/P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} = 258 \left( \frac{0,4/0,1}{0,1/0,4} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 384\text{K}.$$

Робота, одержана в турбодетандорі:

$$\ell_{T0} = \bar{C}_P (T_3 - T_4) = 1,012(283 - 191) = 93\text{кДж/кг}.$$

Холодильний коефіцієнт установки:

$$\varepsilon = q_2/\ell_0 = 67/34,4 = 1,95$$

Теплота, яку відібрало повітря в холодильній камері:

$$q_2 = \bar{C}_P (T_1 - T_4) = 1,012(258 - 191) = 67\text{кДж/кг}.$$

## 2.8 Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 1.** Визначити теоретичну роботу на привід трьохступеневого компресору при стисненні повітря до 15 МПа. Початковий тиск 0,1 МПа, температура  $30^\circ\text{C}$ , показник політропи  $n=1,1$ , об'єм повітря  $10\text{м}^3$ . Визначити температуру в кінці стиснення для кожної ступені.

*Задача 2.* Для ідеального поршньового двигуна із підводом теплоти при  $P=\text{const}$  визначити параметри усіх основних точок, корисну питому роботу та термічний ККД циклу. Дано:  $P_1=0,1$  МПа;  $t_1=350\text{K}$ ;  $\varepsilon=20$ ;  $\rho=2$ ;  $R=287\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $\kappa=1,4$ .

*Задача 3.* В циклі поршньового двигуна із змішаним підводом тепла початковий тиск  $P_1=0,1$  МПа, початкова температура  $t_1=33^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon=12,7$ ;  $\lambda=1,4$ ;  $\rho=1,6$ ;  $R=287\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $C_v=0,72$  кДж/(кг·К);  $\kappa=1,4$ . Визначити параметри в основних точках, корисну роботу та термічний ККД.

*Задача 4.* В циклі газотурбінної установки із підводом теплоти при  $V=\text{const}$  початкові параметри робочого тіла  $P_1=0,1$  МПа;  $t_1=300\text{K}$ ;  $\beta=P_2/P_1=10$ ;  $\kappa=1,4$ . Температура в т.3 не повинна перевищувати  $1100\text{K}$ . Визначити параметри в основних точках, корисну питому роботу, та термічний ККД циклу.

*Задача 5.* Визначити температури усіх точок теоретичного циклу ГТУ із підводом тепла при  $P=\text{const}$ , якщо відомо, що  $t_1=25^\circ\text{C}$ ,  $\beta=5$ , температура газів перед соплами турбіни  $t_3=800^\circ\text{C}$ . Робоче тіло має властивості повітря.

*Задача 6.* Визначити термічний ККД ідеального циклу ГТУ, який працює із підводом теплоти при  $P=\text{const}$ , а також термічний ККД дійсного циклу, якщо внутрішні відносні ККД турбіни та компресора  $\eta_{\text{турб}}=0,88$ ,  $\eta_{\text{компр}}=0,85$ . Відомо, що  $t_1=20^\circ\text{C}$ ,  $\beta=6$ ; температура газів перед соплами турбіни  $t_3=900^\circ\text{C}$ . Робоче тіло має властивості повітря,  $\kappa=1,4$ .

*Задача 7.* Визначити термічний ККД циклу Ренкіна при початковому тиску пару  $P_1=4,0$  МПа та початковій температурі  $t_1=500^\circ\text{C}$ . Кінцевий тиск  $P_2=0,05$  МПа.

*Задача 8.* Паротурбінна установка працює за циклом Ренкіна із перегрітим паром при початкових умовах  $P_1=2,0$  МПа,  $t_1=400^\circ\text{C}$  та кінцевому тиску  $P_2=0,005$  МПа. Визначити термічний ККД циклу та питомі витрати пару.

*Задача 9.* Виконати тепловий розрахунок аміачної холодильної установки, якщо компресор всмоктує аміачний вологий насичений пар при  $t_1=-30^\circ\text{C}$ ,  $X=0,95$  і стискує його адіабатно до тиску  $P_2=1,0$  МПа, температури перегрітого  $t_1=126^\circ\text{C}$ . Температура рідкого аміаку на виході із конденсатора  $t_4=25^\circ\text{C}$ .



## 3 Теплопередача

### 3.1 Реферат

Вступ. Основні положення теплопровідності. Температурне поле. Градієнт температури. Основний закон теплопровідності. Диференційне рівняння теплопровідності. Крайові умови. Теплопровідності через одношарову та багатошарову плоску стінку. Теплопровідність через одношарову та багатошарову циліндричні стінки. Теплопередача через плоскі та циліндричні стінки. Теплопровідність при нестационарному режимі: основні положення, необмежені пластина та циліндр. Основні теорії конвективного теплообміну. Основи теорії подібності. Критерії подібності. Моделювання конвективного теплообміну. Теплообмін при течії рідини в круглих трубах при ламінарному, турбулентному та перехідному режимах. Теплообмін при поперечному омиванні однієї труби та пучків труб. Теплообмін при вільному русі рідини. Загальні відомості про теплообмін випромінюванням. Основні закони теплового випромінювання. Теплообмін випромінюванням між твердими тілами (паралельні пластилини та одне тіло всередині другого). Теплові екрани. Випромінювання газів. Складний теплообмін.

### 3.2 Терміни, позначення

Термін	Буквенне позначення	Одиниця виміру
Градієнт температури	$\text{grad } t \quad \partial t / \partial n$	град/м
Коефіцієнт теплопровідності	$\lambda$	Вт/(м·°C)
Тепловий потік	$Q$	Вт
Густина теплового потоку	$q$	Вт/м <sup>2</sup>
Температуропровідність	$a$	м/с <sup>2</sup>
Коефіцієнт тепловіддачі	$\alpha$	Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)
Температурний напір	$\Delta t$	°C
Термічний опір	$\delta / \lambda$	(м <sup>2</sup> ·°C)/Вт
Коефіцієнт теплопередачі	$K$	Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)
Лінійний коефіцієнт теплопередачі	$K_{\text{л}}$	Вт/(м·°C)
Критерій Біо	$Bi$	—
Критерій Фур'є	$Fo$	—
Безрозмірна координата	$x/l$	—
Температурний критерій	$\Phi$	—
Число Рейнольдса	$Re$	—
Число Прандтля	$Pr$	—
Число Грасгофа	$Gr$	—
Число Нуссельта	$Nu$	—
Число Ейлера	$Eu$	—
Кінематична в'язкість	$\nu$	м/с <sup>2</sup>
Швидкість газу	$\omega$	м/с
Інтегральний потік випромінювання	$Q$	Вт
Густина інтегрального потоку випромінювання	$E$	Вт/м <sup>2</sup>
Інтенсивність випромінювання	$I$	Вт/м <sup>3</sup>
Довжина електромагнітної хвилі	$\lambda$	мкм
Коефіцієнт поглинання тепла	$A$	—
Коефіцієнт пропускання тепла	$R$	—

Коефіцієнт відбивання тепла	<b>D</b>	–
Постійна Стефана-Больцмана	<b><math>\sigma</math></b>	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Коефіцієнт чорноти	<b><math>\varepsilon</math></b>	–
Коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла	<b>C<sub>S</sub></b>	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Коефіцієнт випромінювання сірого тіла	<b>C</b>	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Кутовий коефіцієнт випромінювання	<b><math>\varphi</math></b>	–
Середня товщина газового шару	<b>S<sub>EF</sub></b>	м

### 3.3 Поняття, визначення

Теплопровідність – молекулярний процес передачі теплоти між двома тілами, що торкаються одне другого, або в одному тілі при наявності різниці температур.

Конвекція – процес розповсюдження тепла в рідинах та газах за рахунок переміщення або перемішування об'ємів нерівномірно нагрітих рідин або газу.

Конвективний теплообмін – одночасне розповсюдження теплоти конвекцією та теплопровідністю.

Вільний конвективний теплообмін – теплообмін за рахунок переміщення рідини або газу під впливом різниці температур окремих часток або під час нагрівання.

Випромінювання – процес розповсюдження теплоти за допомогою електромагнітних хвиль.

Складний теплообмін – сукупність теплопровідності, конвекції та випромінювання.

Ізотропне тіло – тіло, яке має однакові фізичні властивості за всіма напрямками.

Температурне поле – сукупність значень температури в певний момент часу для усіх точок тіла.

Нестационарне температурне поле – температура тіла змінюється із часом та за напрямками.

Стационарне температурне поле – температура тіла не змінюється із часом і залежить від координати точки.

Гradient температури – це вектор, який спрямований по нормалі до ізотермної поверхні у напрямку зростання температури і чисельно дорівнює похідній від температури по цьому напрямку.

Коефіцієнт теплопровідності – характеризує здатність тіла проводити тепло. Його числове значення вказує, яка кількість тепла проходить через одиницю ізотермної поверхні за одиницю часу при умові, що gradient температури дорівнює одиниці.

Крайові умови – це сукупність граничних та початкових умов.

Граничні умови першого роду задаються розподілом температури на поверхні тіла для будь-якого моменту часу.

Граничні умови другого роду задаються поверхневою густиною теплового потоку в кожній точці на поверхні тіла для будь-якого моменту часу.

Граничні умови третього роду задаються температурою середовища, яке контактує із тілом, та законом теплопередачі між поверхнею тіла та зовнішнім середовищем.

Початкові умови задаються розподілом температури для моменту часу  $\tau=0$ .

Коефіцієнт тепловіддачі характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла та навколишнім середовищем і чисельно дорівнює кількості тепла, що віддається (сприймається) одиницею поверхні за одиницю часу при різниці температур між поверхнею тіла та зовнішнім середовищем в один градус.

Температурний напір – це різниця температур між окремими поверхнями тіла або між поверхнею тіла та навколишнім середовищем.

Теплопередача – це перенесення тепла від одного рухомого середовища (гарячого) до другого (холодного) через одношарову або багатошарову тверду стіну будь-якої форми.

Коефіцієнт теплопередачі – чисельно дорівнює кількості теплоти, яка проходить через одиницю поверхні стінки за одиницю часу від гарячого до холодного теплоносія при різниці температур між ними в один градус.

Теплова ізоляція – будь-яке покриття гарячої поверхні, яке зменшує втрати тепла в зовнішнє середовище.

Необмежена пластина – розміри пластини в двох напрямках із трьох необмежені.

Ламінарний режим – це рух рідини без пульсацій, спокійний, із утворенням струменів, які повторюють профіль каналу.

Турбулентний режим – це рух рідини, при якому безперервно відбувається перемішування усіх шарів рідини.

Динамічний прикордонний шар – це тонкий шар рідини біля поверхні тіла, в якому відбувається зміна швидкості рідини від швидкості максимальної до нуля безпосередньо на поверхні стінки.

Тепловий прикордонний шар – це шар, в якому змінюється температура рідини від початкової до температури стінки.

Рівняння подібності – це залежність між будь-якими числами подібності, які визначаються, та числами подібності, які визначають вказані числа.

Моделювання – метод експериментального дослідження, в якому вивчають будь-яке фізичне явище на зменшеній моделі.

В'язкісно-гравітаційний режим теплообміну – вимушена течія рідини супроводжується вільною конвекцією.

Селективне випромінювання – це випромінювання газів, які випускають промені на певних довжинах хвилі.

Абсолютно чорна поверхня – це поверхня, яка поглинає всі промені, що падають на неї.

Абсолютно біла поверхня – це поверхня, яка відбиває всі промені, що падають на неї.

### **3.4 Закони, формулювання**

Основний закон теплопровідності (закон Фур'є):

Кількість тепла, що проходить через елементарну площину, яка знаходиться на ізотермній поверхні, пропорційна поверхні площини, відрізка часу та градієнту температури.

Закон Н'ютона для рухомої рідини:

Сила тертя між шарами або частинами рідини, які рухаються із різними швидкостями, пропорційна градієнту швидкості по нормалі до напрямку руху.

Клас явищ – це така сукупність явищ, які характеризуються однаковим механізмом процесів та однаковою фізичною природою.

Теорема подібності:

У подібних явищ критерії подібності чисельно рівні.

Закон Планка:

Спектральна випромінюваність абсолютно чорного тіла та любого реального тіла залежить від температури та довжини хвилі.

Закон Віна:

При збільшенні температури довжина хвилі, на якій випромінювання максимальне, зменшується.

Закон Стефана-Больцмана:

Густина випромінювання чорного тіла пропорційна абсолютній температурі в четвертому ступені.

Закон Кіргофа:

Відношення здатності випромінювати енергію до коефіцієнту поглинання тіла однакове для усіх сірих тіл, якщо вони мають рівну температуру, і дорівнює здатності випромінювати енергію абсолютно чорного тіла при тій же температурі.

Закон Ламберта:

Найбільша енергія випромінюється поверхнею в напрямку, який перпендикулярний до неї.

### 3.5 Основні формули

Гradient температури:

$$\text{grad}t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta t}{\Delta n} \right| = \frac{\partial t}{\partial n}$$

Закон Фур'є:

$$dQ = -\lambda dA \text{grad}t d\tau = -\lambda dA d\tau \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)$$

Густина теплового потоку:

$$q = \frac{d\Phi}{dA} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}$$

Дифференційне рівняння Фур'є:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{C\rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

Закон Н'ютона-Ріхмана:

$$q = \alpha (t_{\text{рід}} - t_{\text{ст}})$$

Кількість тепла, яке проводиться плоскою стінкою:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} A (t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}}) \tau$$

Теплопровідність через багат шарову стінку:

$$Q = \frac{A (t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}})}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$

Теплопровідність через циліндричну стінку:

$$Q = \frac{2\pi l (t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}$$

Теплопередача через плоску стінку:

$$Q = \frac{A(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = kA(t_1 - t_2)$$

Теплопередача через циліндричну стінку:

$$Q = \frac{A(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{зовн}}}} = k_{\text{ц}} \pi l (t_1 - t_2)$$

Критерій Віо:

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda_{\text{ст}}}$$

Критерій Фур'є:

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{l^2}$$

Критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu}$$

Критерій Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

Критерій Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$

Критерій Грасгофа:

$$Gr = \frac{\beta g l^3 \Delta t}{\nu^2}$$

Рівняння подібності:

$$Nu = c Re^h Gr^b Pr^m \left( \frac{Pr_{\text{під}}}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25}$$

Теплообмін випромінюванням між паралельними пластинами:

$$\Phi = C_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A$$

Приведений коефіцієнт випромінювання:

$$C_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{пр}} c_S = \frac{c_S}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Теплообмін випромінюванням між тілами, одне із яких знаходиться всередині другого:

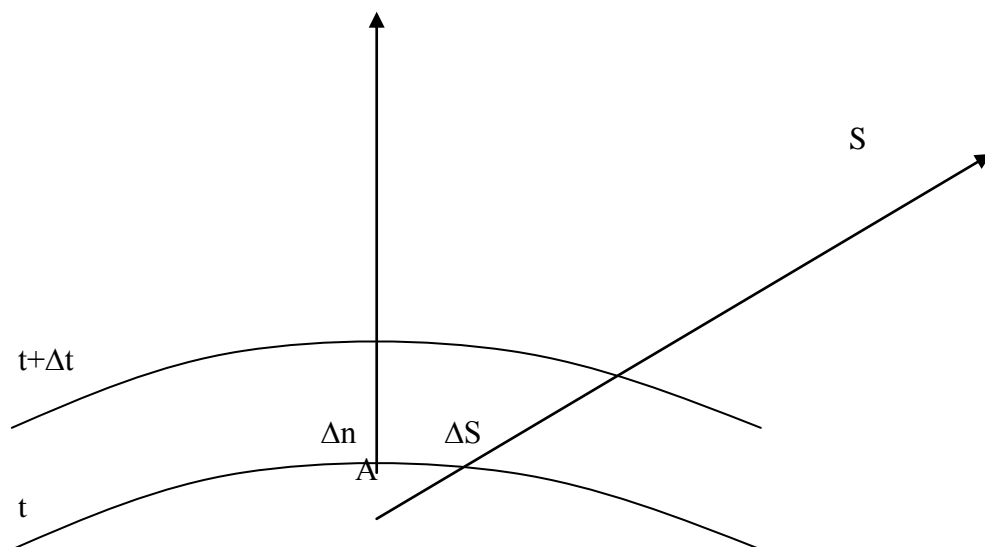
$$\Phi = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_S} \right)} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A_1$$

Ступінь чорноти газу:

$$\varepsilon_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$$

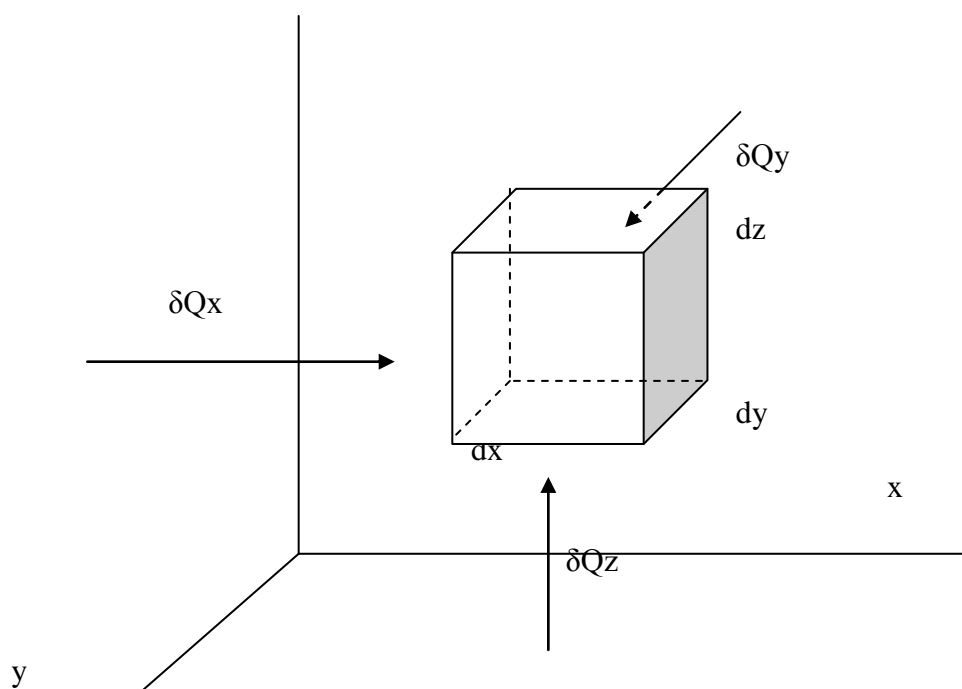
### 3.6 Малюнки, графіки ,таблиці

**n**

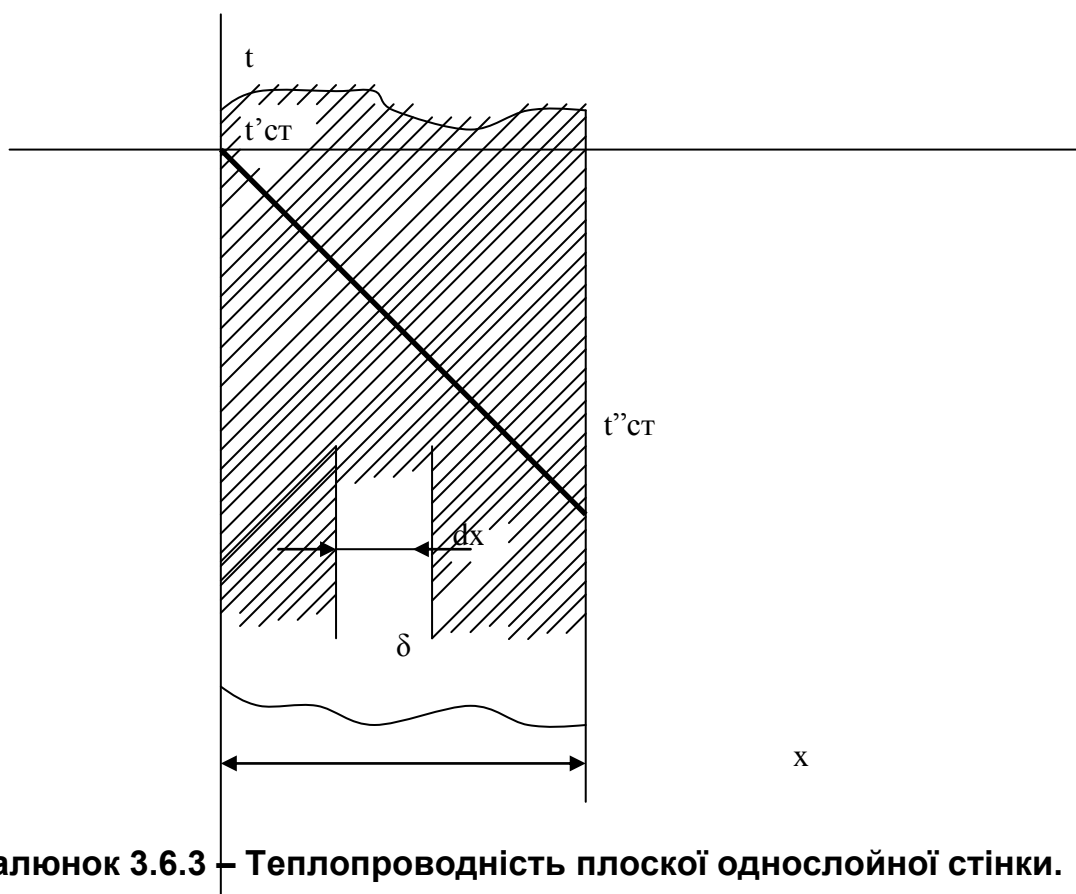


Малюнок 3.6.1- Изотермічні поверхні з температурами  $t$  і  $t+\Delta t$ .

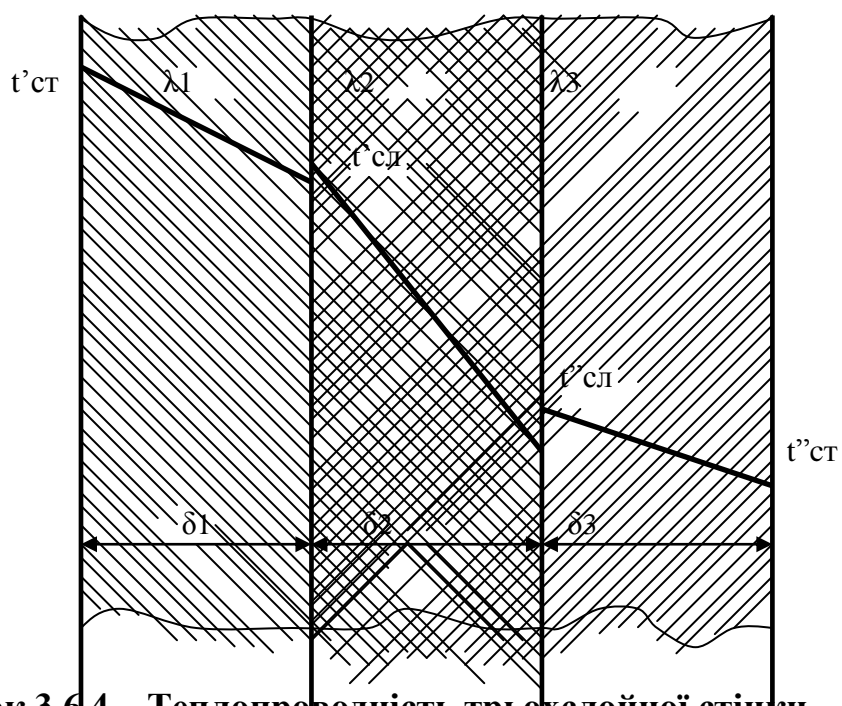
**z**



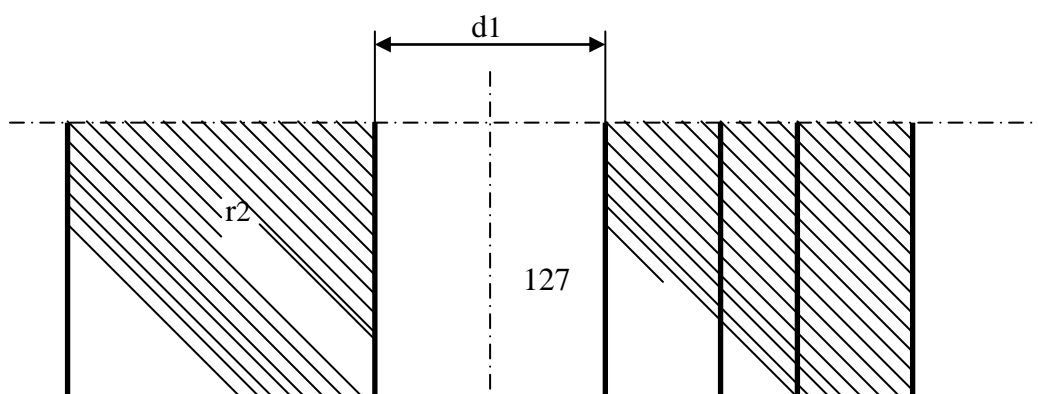
Малюнок 3.6.2 – Елементарний паралелепіпед з ребрами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ .

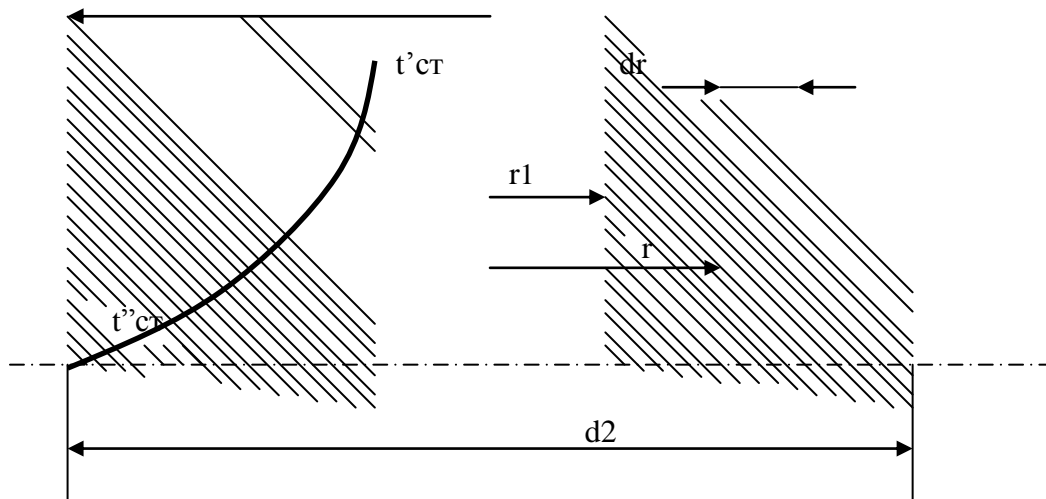


**Малюнок 3.6.3 – Теплопроводність плоскої одношарової стінки.**

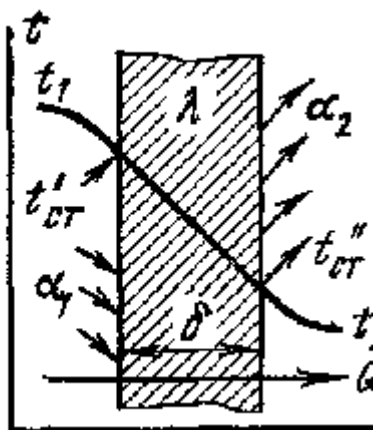


**Малюнок 3.6.4 – Теплопроводність трьохшарової стінки.**

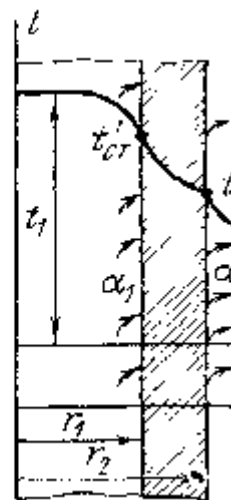




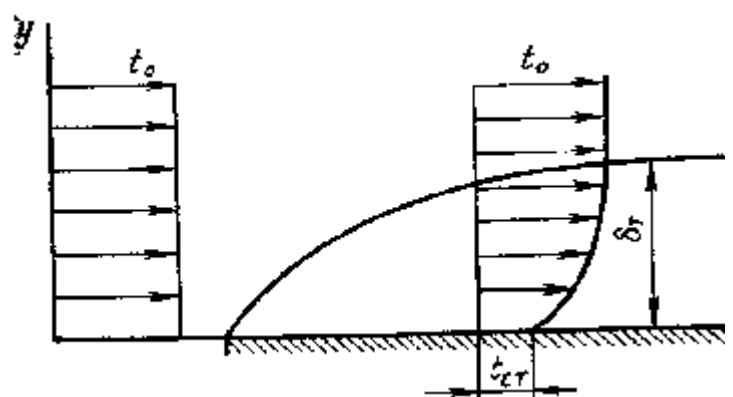
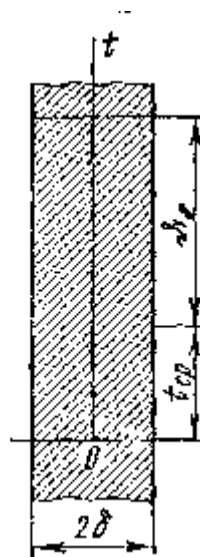
Малюнок 3.6.5 – Труба, з радіальним напрямом теплового потоку.



Малюнок 3.6.6-Теплопередача крізь плоску стінку

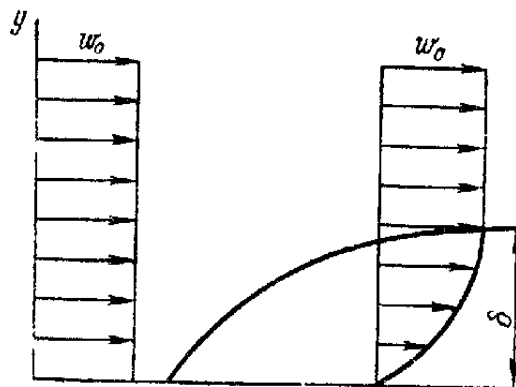


Малюнок 3.6.7- Теплопередача крізь циліндричну стінку

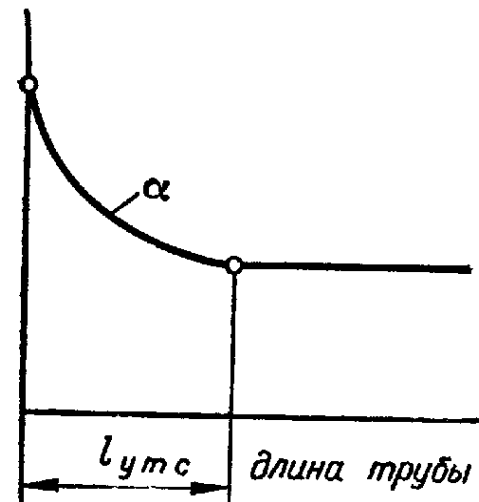




Малюнок 3.6.8-Охолодження плоскопаралельної пластини

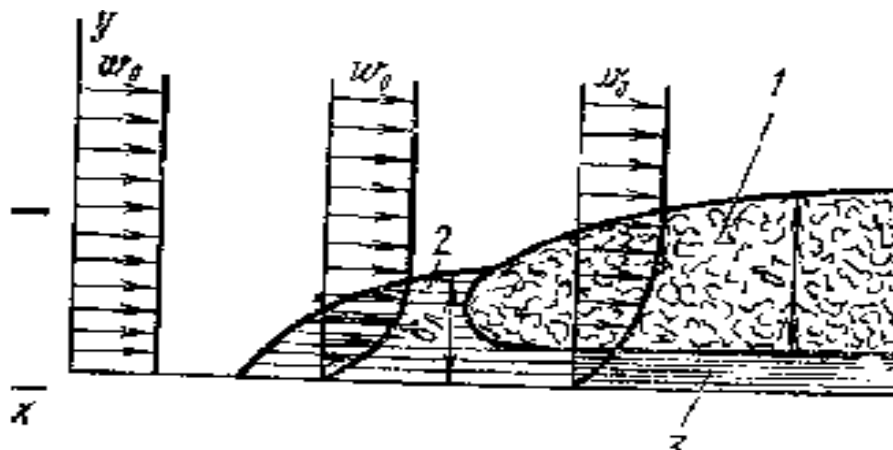


Малюнок 3.6.9-Виникнення теплового прикордонного шару

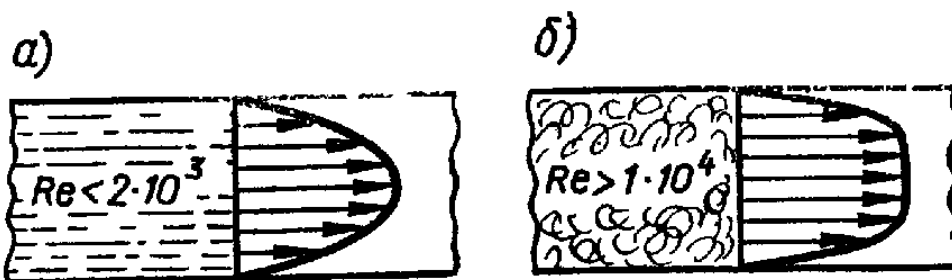


Малюнок 3.6.10- Виникнення динамічного прикордонного шару

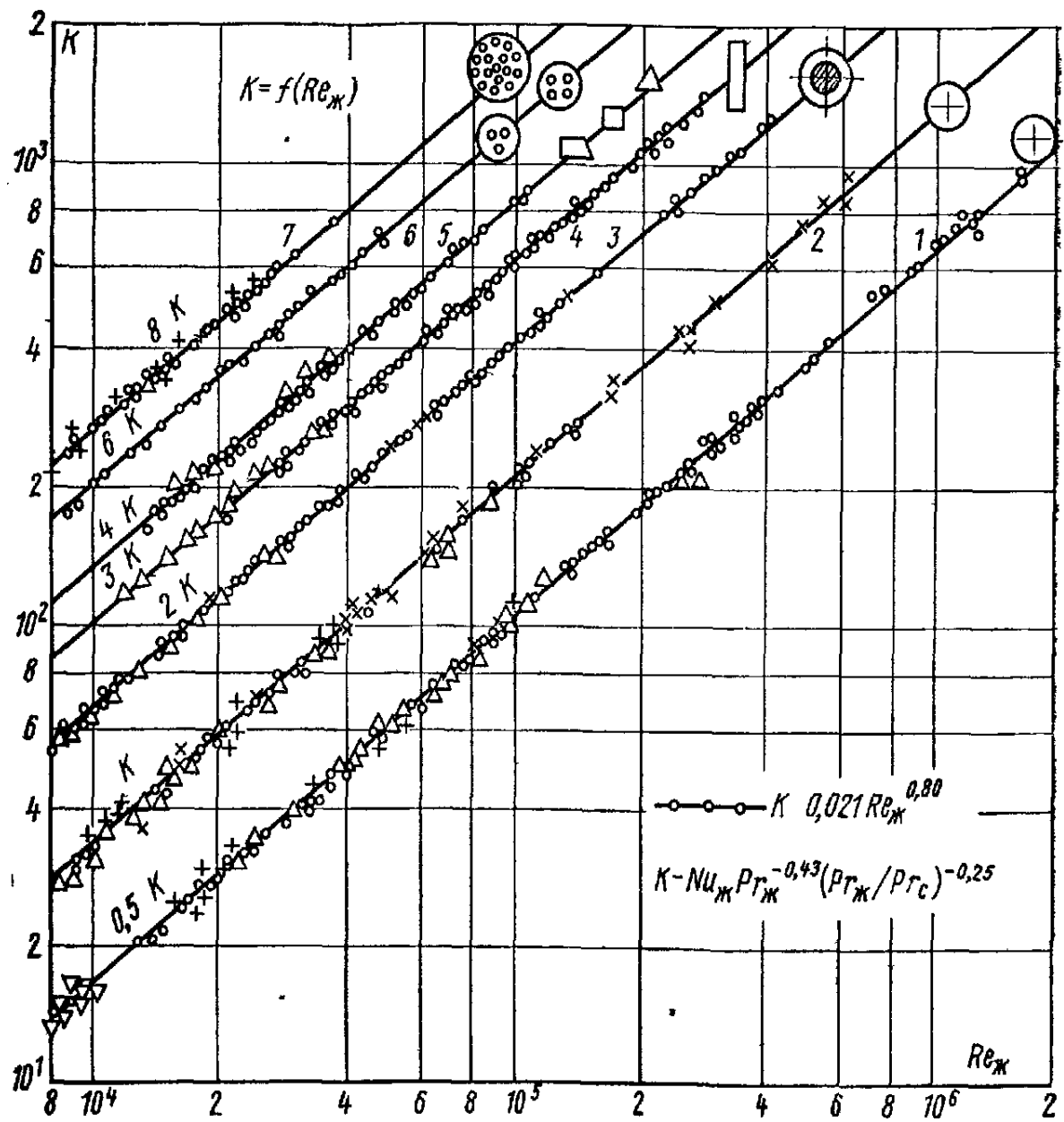
Малюнок 3.6.12-Зміна коефіцієнта тепловіддачі вздовж труби



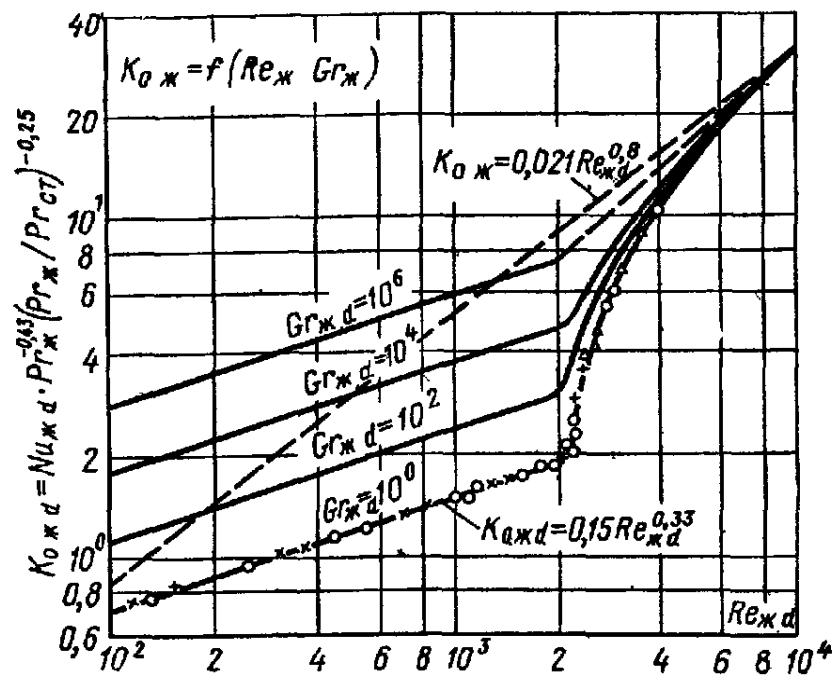
Малюнок 3.6.11-Плин в прикордонному шарі (1)-турбулентний (2)-ламінарий



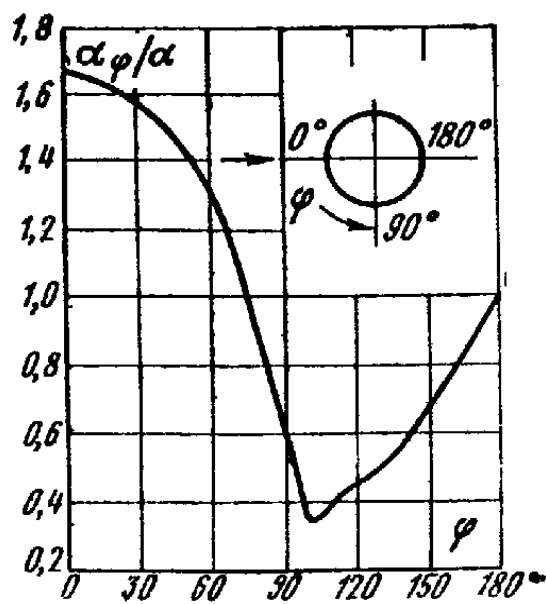
Малюнок 3.6.13-Розподіл швидкостей плин у рідині по площі перерізу потоку (а) при ламинарному, (б) при турбулентному рухах



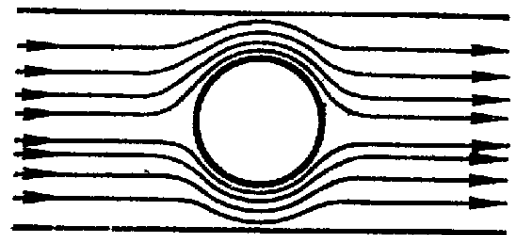
Малюнок 3.6.14-Середня тепловіддача при турбулентному режимі плину рідини в трубах



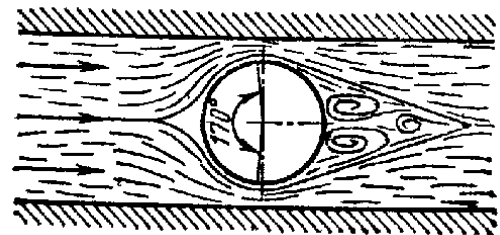
Малюнок 3.6.15-Криві комплексу  $K_0$  в перехідній області від числа  $Re$



Малюнок 3.6.16-Зміна коефіцієнта тепловіддачі в залежності від кута  $\varphi$

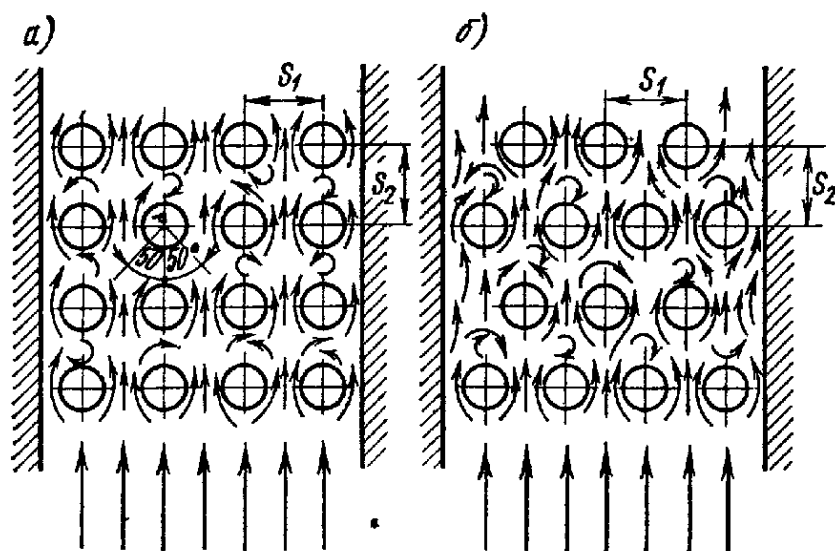


а)

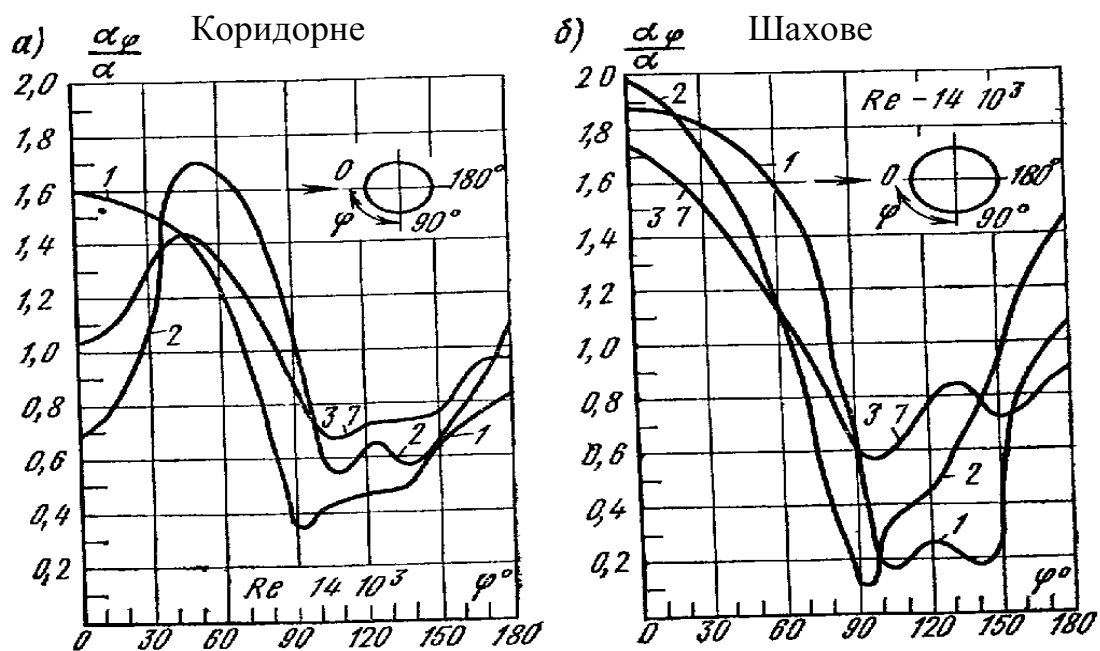


б)

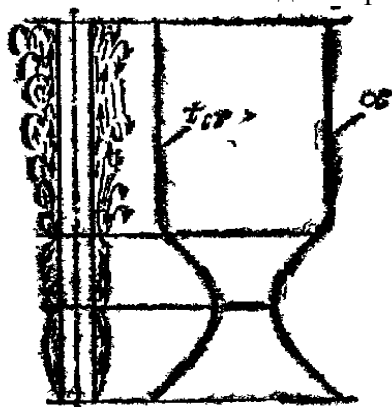
Малюнок 3.6.17-омивання поверхні круглої труби а) при  $Re < 5$   
б) при  $Re > 5$



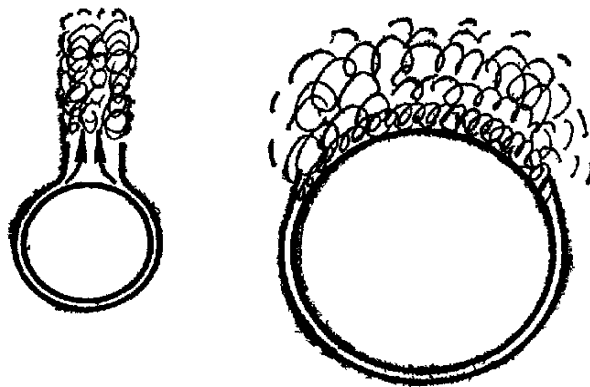
Малюнок 3.6.18-Коридорна (а) та шахова (б) схема розміщення труб в пучках



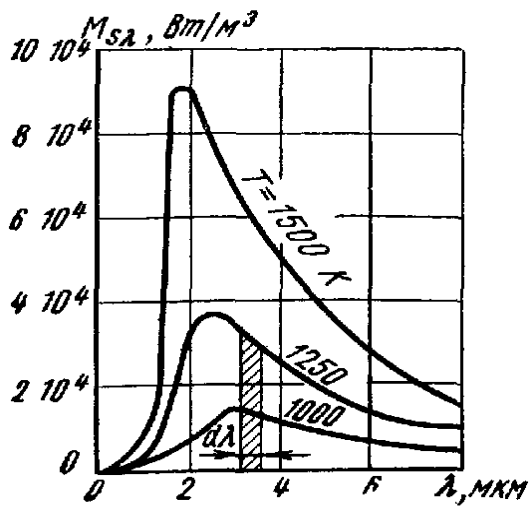
Малюнок 3.6.19-Теплообмін для коридорної (а) та шахової (б) схеми розміщення труб в пучках



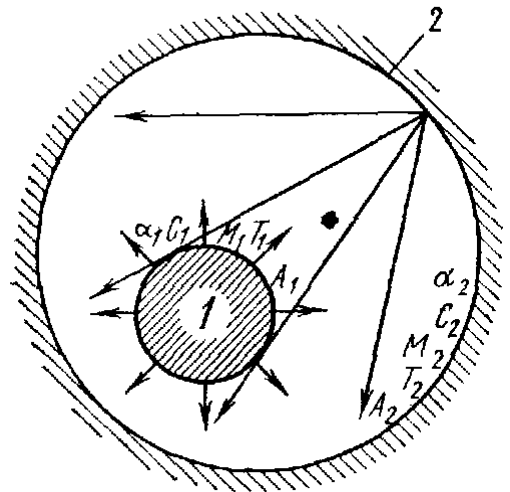
Малюнок 3.6.20-Теплообмін біля вертикальної труби



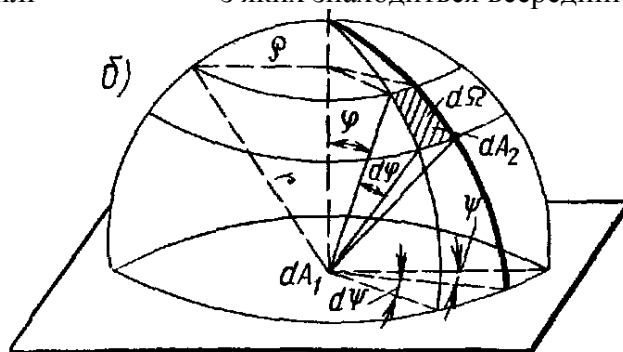
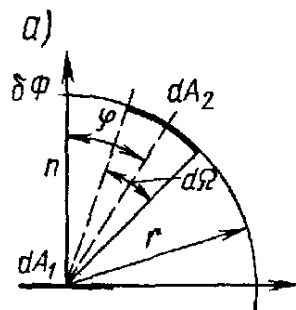
Малюнок 3.6.21-Теплообмін біля горизонтальних труб



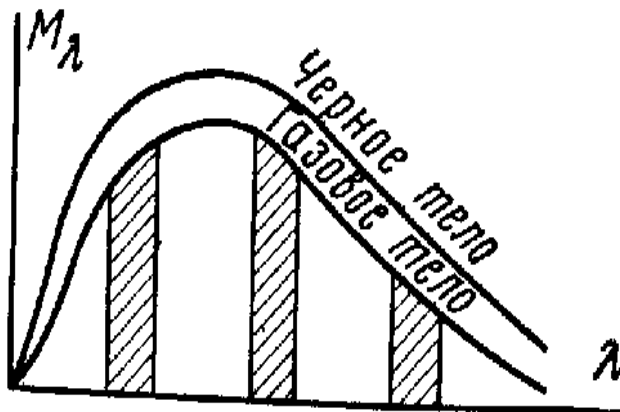
Малюнок 3.6.22-Залежність випромінювання від температури та довжини хвилі



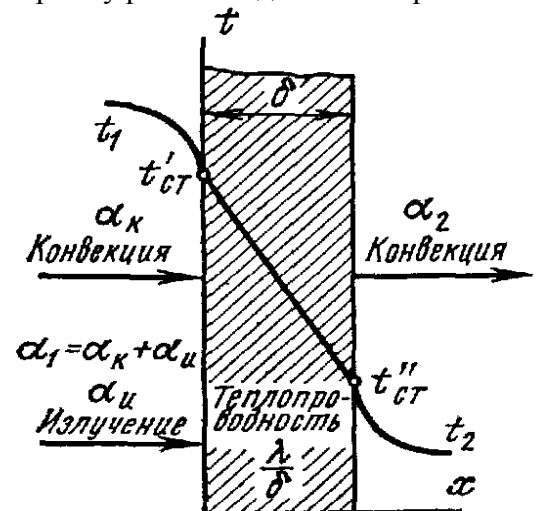
Малюнок 3.6.24-Теплообмін між тілами, одне з яких знаходиться всередині другого



Малюнок 3.6.23-Залежність випромінювання від напрямку розповсюдження енергії



Малюнок 3.6.25-Селективний характер випромінювання



Малюнок 3.6.26-Складний теплообмін

### 3.7 Запитання для самоконтролю

1. Назвіть основні випадки теплообміну.
2. Що називають теплопровідністю?
3. Що називають конвективним теплообміном?
4. Що називають випромінюванням?
5. Що називають складним теплообміном?
6. Що таке градієнт температури?
7. Закон Фур'є.
8. Рівняння Фур'є.
9. Що називають температуропровідністю?
10. Як задають граничні умови?
11. Що таке коефіцієнт тепловіддачі?
12. Закон Н'ютона-Ріхмана.
13. Рівняння теплопровідності через плоску стінку.
14. Рівняння теплопровідності через циліндричну стінку.
15. Що називають теплопередачею?
16. Рівняння теплопередачі.
17. Що називають коефіцієнтом теплопередачі?
18. Що називають нестационарним температурним полем?
19. Рівняння температурного поля для нестационарного режиму.
20. Із яких критеріїв подібності складається рівняння температурного поля?
21. Динамічний та тепловий граничні шари та їх фізична суть.
22. Які бувають режими течії рідини та чим вони відрізняються?
23. Яким є механізм передачі тепла при ламінарному та турбулентному режимах?
24. Як збільшити коефіцієнт тепловіддачі від поверхні стінки до рідини?
25. Чому для визначення коефіцієнтів тепловіддачі використовують теорію подібності?
26. Яке рівняння називають рівнянням подібності?
27. Яким співвідношенням враховують напрямок теплового потоку?
28. Описати механізм виникнення вільного руху рідини.
29. Які пучки труб використовують в теплотехніці?
30. Природа енергії випромінювання.
31. Що називають коефіцієнтом поглинання, відбивання та пропускання?
32. Закон Планка та його графічне зображення.
33. Закон Віна.
34. Закон Стефана-Больцмана.
35. Що називають ступенем чорноти?
36. Закон Кіргофа.
37. Закон Ламберта.
38. Теплові екрани.
39. Випромінювання газів.
40. Складний теплообмін.

### 3.8 Типові задачі із розв'язанням

**Задача 1.** Плоска стальна стінка із  $\lambda_1=50$  Вт/(м·К) та товщиною  $\delta_1=0,02$  м ізолювана від теплових втрат шаром асбестового картону із  $\lambda_2=0,15$  Вт/(м·К) товщиною  $\delta_2=0,2$  м та шаром вати із  $\lambda_3=0,045$  Вт/(м·К) товщиною  $\delta_3=0,1$  м. Визначити товщину шару пенобетону із  $\lambda=0,08$  Вт/(м·К) замість картону та вати, щоб властивості теплоізоляції не змінилися.

**Розв'язання.** Визначимо еквівалентну теплопровідність для трьохшарової плоскої стінки.

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{0,02 + 0,2 + 0,1}{\frac{0,02}{50} + \frac{0,2}{0,15} + \frac{0,1}{0,45}} = 0,092 \text{ Вт/}(\text{м} \cdot \text{К})$$

Запишемо рівняння для еквівалентної теплопровідності для двохшарової стінки:

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\delta_1 + \delta}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta}{\lambda}}; \quad 0,092 = \frac{0,02 + X}{\frac{0,02}{50} + \frac{X}{0,08}};$$

$$X = 0,133 \text{ м.}$$

**Задача 2.** Стальна парова труба діаметром  $d_1/d_2 = 180/200$  мм і теплопровідністю  $\lambda_1 = 50$  Вт/(м·К) вкрита шаром паратривкої ізоляції товщиною  $\delta_2 = 50$  мм,  $\lambda_2 = 0,18$  Вт/(м·К) та шаром мінвати із  $\delta_3 = 50$  мм,  $\lambda_3 = 0,06$  Вт/(м·К). Температура пари, яка рухається всередині труби  $t_1 = 427$  °С, температура зовнішнього повітря  $t_2 = 27$  °С. Коефіцієнт тепловіддачі від пари до труби  $\alpha_1 = 200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Визначити втрати тепла на 1 м довжини труби та температури окремих шарів.

**Розв'язання.** Визначимо діаметри ізоляції та труби:

Діаметри труби:  $d_{\text{вн}} = 0,18$  м;  $d_1 = 0,2$  м.

Діаметр ізоляції:  $d_2 = d_1 + 2\delta_2 = 200 + 2 \cdot 50 = 300$  мм = 0,3 м.

Діаметр мінвати:  $d_3 = d_{\text{звн}} = d_2 + 2\delta_3 = 300 + 2 \cdot 50 = 400$  мм = 0,4 м.

Теплові втрати на 1 м:

$$q_l = \kappa_q \pi (t_1 - t_2) = \frac{\pi (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_{\text{вн}}} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_1}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{зовн}}}} =$$

$$= \frac{3,14(427 - 27)}{\frac{1}{200 \cdot 0,18} + \frac{1}{2 \cdot 50} \ln \frac{0,2}{0,18} + \frac{1}{2 \cdot 0,18} \ln \frac{0,3}{0,2} + \frac{1}{2 \cdot 0,06} \ln \frac{0,4}{0,3} + \frac{1}{10 \cdot 0,4}} = 330 \text{ Вт}$$

Температура внутрішньої поверхні труби:

$$t'_{\text{ст}} = t_1 - \frac{q}{\alpha_1 d_{\text{вн}} \pi} = 427 - \frac{330}{200 \cdot 0,18 \cdot 3,14} = 424^\circ \text{C.}$$

Прийmemo, що  $t'_{\text{ш}} = t'_{\text{ст}} = 424^\circ \text{C.}$

Температура зовнішньої поверхні ізоляції:

$$t''_{\text{ш}} = t'_{\text{ш}} - \frac{q}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1} = 424 - \frac{330}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,18} \ln \frac{0,3}{0,2} = 306^\circ \text{C.}$$

Температура зовнішньої поверхні мінвати:

$$t''_{\text{см}} = t_2 + \frac{q}{\alpha_2 d_{\text{зовн}} \pi} = 27 + \frac{330}{10 \cdot 0,4 \cdot 3,14} = 53,3^\circ \text{C}$$

**Задача 3.** Визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  повітря, яке рухається із швидкістю  $\omega=10$  м/с, до стінки прямої труби діаметром  $d=0,1$  м та довжиною  $l=2$  м. Середня температура повітря  $t_{\text{пов}}=120$  °С.

**Розв'язання.** Визначимо режим руху повітря у трубі. Для цього визначимо критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu} = \frac{10 \cdot 0,1}{25,45 \cdot 10^{-6}} = 39200 > 10000,$$

де  $\nu=25,45 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при  $t_{\text{пов}}=120$  °С за табл. 1.6.10. Так як режим руху турбулентний, то для визначення коефіцієнту тепловіддачі використаємо рівняння (27.10) /2/:

$$Nu=0,018Re^{0,8}=0,018 \cdot 39200^{0,8}=85,2$$

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{85,2 \cdot 0,0334}{0,1} = 28,4 \text{ Вт / (м}^2\text{К)},$$

де  $\lambda=0,0334$  Вт/(м<sup>2</sup> К) за табл. 1.6.10

Так як  $l/d=2/0,1=20<50$ , то необхідно ввести поправку  $\bar{\varepsilon}_1 = 1,13$ . Тоді коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_d = \alpha \bar{\varepsilon}_1 = 28,4 \cdot 1,13 = 32,2 \text{ Вт / (м}^2\text{К)}.$$

**Задача 4.** Визначити передачу тепла при вільній конвекції від вертикальної труби діаметром  $d=120$  мм та висотою  $h=6$  м повітря. Температура стінки  $T_{\text{ст}}=523$  К, температура повітря  $T_{\text{пов}}=293$  К.

**Розв'язання.** Визначимо режим руху повітря вздовж труби. Для цього підрахуємо множину  $Gr \cdot Pr$ :

$$Gr = \frac{\beta h^3 g \Delta T}{\nu^2} = \frac{6^3 9,81 (523 - 293)}{293 (15,06 \cdot 10^{-6})^2} = 7,34 \cdot 10^{12},$$

де  $\nu=15,06 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с за табл. 1.6.10

$$Gr \cdot Pr = 7,34 \cdot 10^{12} \cdot 0,703 = 5,16 \cdot 10^{12},$$

де  $Pr=0,703$  за табл. 1.6.10.

Так як  $Gr \cdot Pr > 6 \cdot 10^6$ , то режим турбулентний і рівняння подібності має вигляд:

$$Nu=0,15(Gr \cdot Pr)^{0,33}=0,15(5,16 \cdot 10^{12})^{0,33}=2320,$$

Тоді коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{h} = \frac{2320 \cdot 0,026}{6} = 10 \text{ Вт / (м}^2\text{ К)}$$

де  $\lambda=0,026$  Вт/(м<sup>2</sup> К) за табл. 1.6.10.

Втрати тепла трубою:

$$Q = \alpha A (T_{\text{ст}} - T_{\text{пов}}) = \alpha \pi d h (T_{\text{ст}} - T_{\text{пов}}) = 10 \cdot 3,14 \cdot 0,12 \cdot 6 \cdot (523 - 293) = 5200 \text{ Вт}$$

**Задача 5.** Між двома поверхнями встановлено екран, коефіцієнт випромінювання поверхонь та екрану  $C_1=C_2=C_{\text{екр}}=4,8$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>), температури поверхонь  $T_1=600$  К,  $T_2=300$  К.



Визначити теплообмін випромінюванням до і після установки екрану, а також температуру екрану.

**Розв'язання.** Променевий потік між поверхнями до установлення екрану:

$$\Phi = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_S}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{1}{\frac{1}{4,8} + \frac{1}{4,8} - \frac{1}{5,77}} \times \\ \times \left[ \left( \frac{600}{100} \right)^4 - \left( \frac{300}{100} \right)^4 \right] = 5070 \text{ Вт / м}^2.$$

Променевий потік після установки екрану:

$$\Phi_1 = 0,5\Phi = 0,5 \cdot 5070 = 2535 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура екрану:

$$\left( \frac{T_{\text{екр}}}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 + \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{600}{100} \right)^4 + \left( \frac{300}{100} \right)^4 \right] = 690. \\ T_{\text{екр}} = 100 \sqrt[4]{690} = 512 \text{ К}.$$

### 3.9 Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 1.** В приміщенні встановлено циліндричний сталевий підігрівач повітря без ізоляції. Коефіцієнт випромінювання поверхні підігрівача  $C_1=4,9 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$ , температура поверхні  $t_1=270 \text{ }^\circ\text{C}$ , довжина підігрівача  $l=2,5 \text{ м}$ , діаметр  $d=0,6 \text{ м}$ , температура приміщення  $t_2=20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт випромінювання стін  $C_1=4,9 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$ , довжина приміщення  $l_{\text{п}}=16 \text{ м}$ , ширина  $a_{\text{п}}=7 \text{ м}$ , висота  $h_{\text{п}}=3,2 \text{ м}$ . Визначити теплообмін випромінюванням між підігрівачем та стінами приміщення.

**Задача 2.** Визначити теплообмін випромінюванням між двома великими паралельними поверхнями із температурами  $t_1=527 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_2=130 \text{ }^\circ\text{C}$ , які мають відповідно коефіцієнти випромінювання:  $C_1=3,3 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$ ,  $C_2=3,9 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$ .

**Задача 3.** Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від поперечного потоку нагрітого повітря до стінок шестирядного пучка труб. Труби діаметром  $d=76 \text{ мм}$  розміщені за коридорною схемою. Середня швидкість повітря  $\omega=7,6 \text{ м/с}$ , температура повітря перед пучком  $t_{\text{п1}}=130 \text{ }^\circ\text{C}$ , після пучка  $t_{\text{п2}}=490 \text{ }^\circ\text{C}$ , кут атаки  $\varphi=50^\circ$ .

**Задача 4.** Циліндрична труба із зовнішнім діаметром  $d=36 \text{ мм}$  та довжиною  $l=7 \text{ м}$  охолоджується поперечним потоком води із температурою перед пучком  $t_{\text{в}}=19 \text{ }^\circ\text{C}$ . Швидкість води  $\omega=2,4 \text{ м/с}$ , температура поверхні труби  $t_{\text{сТ}}=205^\circ\text{C}$ , кут атаки  $\varphi=60^\circ$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі від труби до води та тепловий потік.

**Задача 5.** Визначити коефіцієнт тепловіддачі та тепловий потік, якщо в горизонтальній трубі діаметром  $d=0,07 \text{ м}$  та довжиною  $l=5,4 \text{ м}$  рухається вода із швидкістю  $\omega=0,6 \text{ м/с}$  із температурою  $t_{\text{в}}=93 \text{ }^\circ\text{C}$  при температурі стінки труби  $t_{\text{сТ}}=24 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Задача 6.** Визначити густину теплового потоку, що проходить через плоску сталеву стінку товщиною  $\delta=15 \text{ мм}$  із  $\lambda=44 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  від газу із температурою  $t_1=970^\circ\text{C}$  до води, що кипить при

$t_2=201^{\circ}\text{C}$ . Коефіцієнт тепловіддачі газів до стінки труби  $\alpha_1=125 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , від стінки до води  $\alpha_2=4750 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

*Задача 7.* Визначити коефіцієнт теплопередачі та температури між шарами стінки, яка складається із трьох шарів: внутрішній – цегла товщиною  $\delta_1=230 \text{ мм}$  із  $\lambda_1=1,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , середній – діатоміт товщиною  $\delta_2=115 \text{ мм}$  із  $\lambda_2=0,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  і зовнішній – вата товщиною  $\delta=75 \text{ мм}$  із  $\lambda=0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Температура газу, що контактує із внутрішньою поверхнею  $t_1=720^{\circ}\text{C}$ , коефіцієнт тепловіддачі від газу до цегли  $\alpha_1=315 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , температура зовнішнього повітря  $t_2=17^{\circ}\text{C}$ , від вати до повітря  $\alpha_2=6,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

## 4 Механіка пічних газів

### 4.1 Реферат

Основні властивості пічних газів. Незалежність тиску від орієнтації поверхні у просторі. Вимірювання тиску газу. Основні рівняння кінематики та динаміки газів; рівняння нерозривності, Ейлера, Бернуллі. Статика одного газу. Статика пічних газів. Рівняння Бернуллі для пічних газів. Загальні положення руху пічних газів. Рух та тиск газів у робочих камерах печей. Втрати енергії газів при русі в каналах. Вентилятори та димососи. Статика димової труби.

### 4.2 Терміни, позначення

Терміни	Літерне позначення	Одиниця виміру
Динамічний коефіцієнт в'язкості	$\mu$	Па·с
Густина газу	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>
Прискорення вільного падіння	$g$	м/с <sup>2</sup>
Висота стовпа пічних газів	$H$	м
Геометричний тиск	$P_{\Gamma}$	Па
П'єзометричний тиск	$P_{\text{ст}}$	Па
Динамічний тиск	$P_{\text{д}}$	Па
Втрати тиску	$\Delta P_{\text{вт}}$	Па
Коефіцієнт теплового розширення газів	$\beta$	1/К
Питома вага газів	$\gamma$	Н/м <sup>3</sup>
Втрати тиску на тертя	$\Delta P_{\text{тер}}$	Па
Втрати тиску на місцевий опір	$\Delta P_{\text{м.о.}}$	Па
Гідравлічний коефіцієнт тертя	$\mu$	-
Гідравлічний діаметр каналу	$d_{\Gamma}$	м

### 4.3 Поняття, визначення

Механіка газів- наука про закони рівноваги та руху газів.

Статика газів- це стан нерухомого газу, який знаходиться у рівновазі.

Кінематика газів- це стан газів, коли він рухається рівномірно без прискорення.

Динаміка газів- це стан газу, коли швидкість його переміщення постійно змінюється.

Динамічний коефіцієнт в'язкості газу- характеризує в'язкість газу в залежності від його фізичних властивостей та температури.

Кінематичний коефіцієнт в'язкості газу- характеризує прискорення часток газу під впливом дії в'язкості.

Геометричний тиск- це тиск стовпа газу, який залежить від висоти стовпа та густини газу.

Статичний тиск- це тиск газу, який залежить від взаємодії часток газу і порівнюється із атмосферним тиском.

Динамічний або швидкісний тиск газу - це тиск, який залежить від швидкості газу та його густини.

Питома вага газу - це вага одиниці об'єму газу, яка залежить від прискорення земного тяжіння.

Нерозривність газу - це стан газу, коли він представляє собою суцільну масу без порожнечі.

Сили інерції- це сили, які протидіють переміщенню газу і залежать від маси та прискорення газів.

Геометричний напір - характеризує висоту газу відносно довільно вибраної горизонтальної поверхні.

Статичний напір - це висота стовпа рідини, що врівноважує тиск в даній точці газу.

Динамічний напір - це висота, при падінні із якої тіло у вакуумі досягає значення швидкості газу.

Димова труба - це труба, яка створює розрідження і за рахунок цього виводить пічні гази із печі до зовнішнього середовища.

Втрати тиску газу на тертя - це зниження тиску газу при переміщенні по каналу за рахунок в'язкості газу .

Втрати тиску газу на місцевий опір- це зменшення або збільшення швидкості газу при зміні геометричних параметрів перерізу каналу.

Вентилятор- це пристрій для переміщення газів.

Відцентровий вентилятор- це вентилятор, у якого газ входить до робочого колеса вздовж осі обертання колеса, а виходить радіально.

Осьовий вентилятор- це вентилятор, у якому газ переміщується тільки вздовж осі обертання колеса.

Димосос- це вентилятор, який використовують для забезпечення примусової штучної тяги для переміщення пічних газів.

#### 4.4 Закони, формулювання

Незалежність тиску газу від орієнтації поверхні: тиск в одній точці газу не залежить від орієнтації поверхні у просторі.

Нерозривність газу: швидкість зміни густини газу обернено пропорційна швидкості зміни об'єму газу.

Основний принцип механіки: сума проєкцій сил, які діють на тіло, дорівнює множині маси рухомого тіла на його прискорення.

Закон Бернуллі: при сталому русі ідеальної рідини сума геометричного, статичного та динамічного тисків є величина постійна в будь якому перерізі струменя газу.

Закон Паскаля: кожний метр квадратний землі отримує тиск, який дорівнює вазі стовпа газу.

#### 4.5 Основні формули

Динамічний коефіцієнт в'язкості:

$$\mu = \rho \nu .$$

Геометричний тиск газу:

$$P_{geom} = H(\rho_{нов} - \rho_z)g .$$

Динамічний тиск газу:

$$P_{шв} = \frac{\rho \omega^2}{2g} .$$

Питома вага газу:

$$\gamma = \rho g .$$

Рівняння нерозривності:

$$\frac{d\rho}{d\tau} = -\rho \left( \frac{\partial \omega_x}{\partial x} - \frac{\partial \omega_y}{\partial y} - \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right) .$$

Рівняння Бернуллі для прискореного руху газів:

$$x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{d\omega_x}{d\tau}; \quad y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{d\omega_y}{d\tau}; \quad z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{d\omega_z}{d\tau}.$$

Рівняння Ейлера для газу, що знаходиться у спокої, або рухається рівномірно:

$$x = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad y = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}; \quad z = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Рівняння Бернуллі для ідеального газу:

$$\rho gZ + P + \rho \frac{\omega^2}{2} = \text{const}.$$

Рівняння Бернуллі для пічних газів:

$$(Z_1 - Z_2)(\gamma_z - \gamma_{нов}) + h_{cm_1} + h_{o_1} = h_{cm_2} + h_{o_2} + h_{втр}.$$

Висота димової труби:

$$H = \frac{\Delta P + \rho_z \frac{\omega_z^2}{2}}{g(\rho_n - \rho_z) - \mu_{тер} \rho_z \frac{\omega_{cp}^2}{2d_{cp}}}.$$

Втрати тиску газу на тертя:

$$P_{тер} = 0,5 \mu_{тр} \ell \rho_z \frac{\omega_z^2}{2d_z}.$$

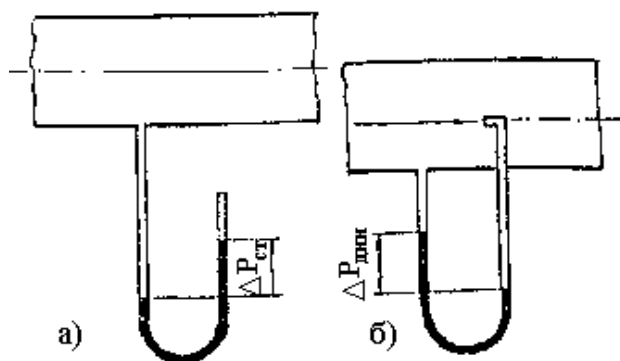
Втрати тиску газу на місцевий опір:

$$P_{м.о.} = \kappa \rho_z \frac{\omega_z^2}{2}.$$

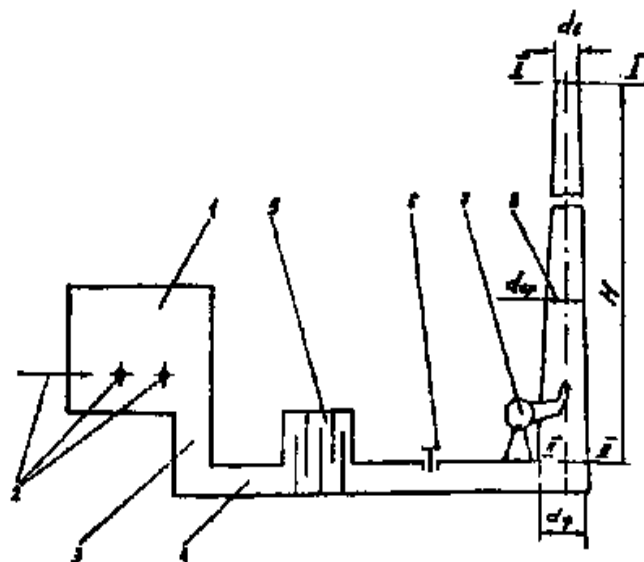
Площа перерізу вихідної частини труби:

$$S = V / (3600 \omega_s).$$

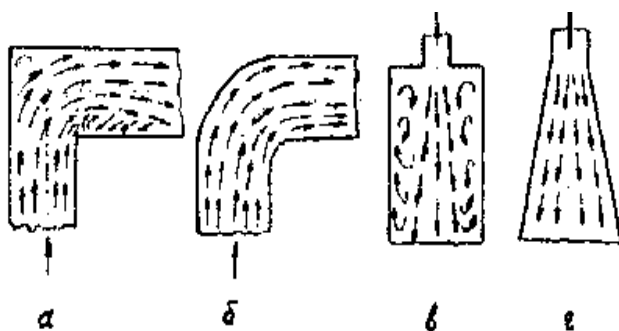
#### 4.6 Малюнки, графіки, таблиці



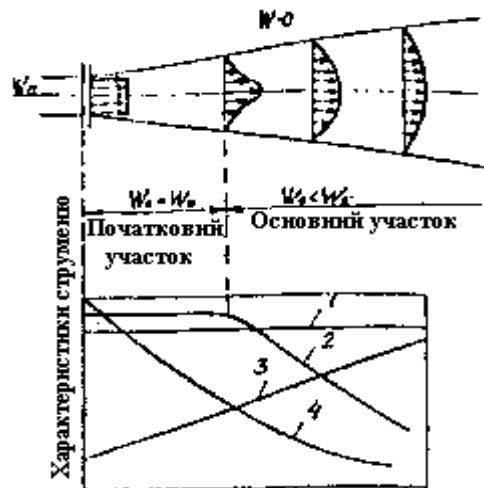
Малюнок 4.6.1-Схема вимірювання тиску:  
а) статичного; б) динамічного



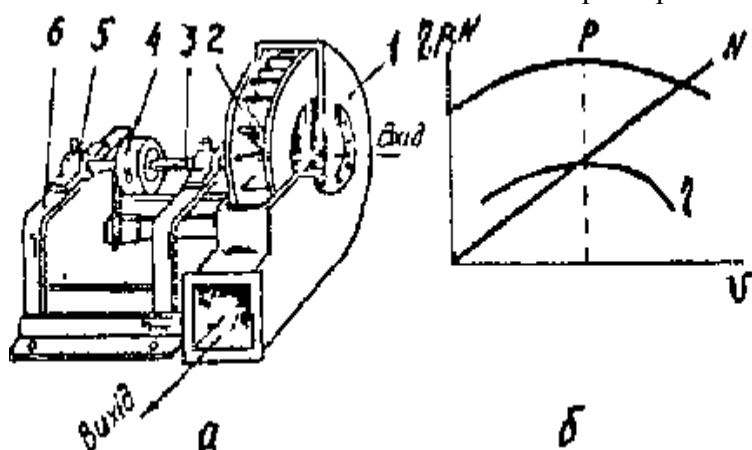
Малюнок 4.6.2-Схема виходу димових газів з печі



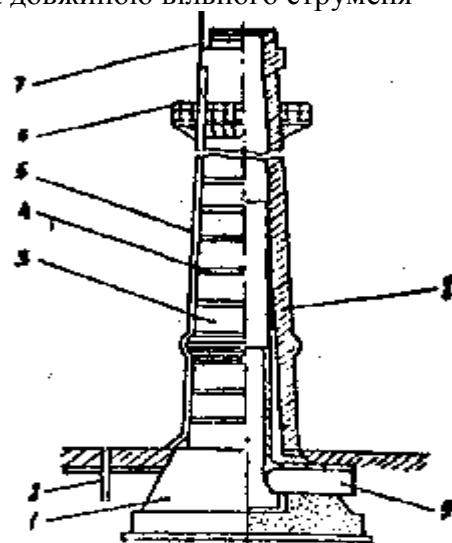
Малюнок 4.6.3-Характер руху потоків



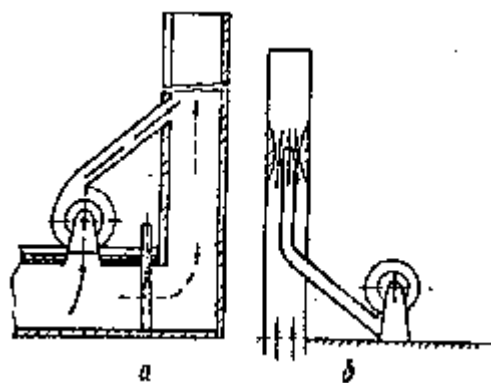
Малюнок 4.6.4-Розподіл швидкостей та зміна характеристик за довжиною вільного струменя



Малюнок 4.6.5-Відцентрований вентилятор



Малюнок 4.6.6-Цегляна димова труба



Малюнок 4.6.7-Схема димососів

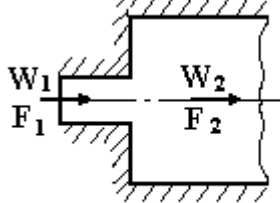
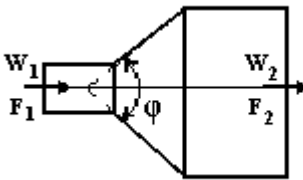
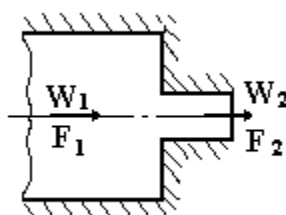
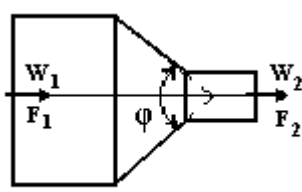
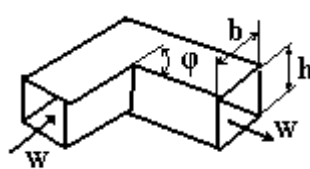
Таблиця 4.6.8-Фізичні параметри диму при тиску  
101300 Па

Температура $K(^{\circ}C)$	$C_p$ , $кДж/(м^3 \cdot K)$	$\lambda \times 10^{-2}$ , $Вт/(м \cdot K)$	$a \times 10^4$ , $м^2/с$ , ( $\times 10^2$ , $м^3/ч$ )	$\rho$ , $кг/м^3$	$v \times 10^{-6}$ , $м^3/с$	Pr
273 (0)	1,041	2,28	0,169 (6,08)	1,295	12,20	0,72
373 (100)	1,068	3,02	0,308 (11,10)	0,950	21,54	0,69
473 (200)	1,096	4,02	0,489 (17,60)	0,748	32,80	0,67
573 (300)	1,121	4,85	0,698 (25,16)	0,617	45,81	0,65
673 (400)	1,150	5,71	0,941 (33,94)	0,525	60,38	0,64
773 (500)	1,183	6,56	1,210 (43,61)	0,457	76,30	0,63
873 (600)	1,212	7,44	1,510 (54,32)	0,405	93,61	0,62
973 (700)	1,239	8,29	1,840 (66,17)	0,363	112,10	0,61
1073 (800)	1,262	9,16	2,200 (79,09)	0,3295	131,80	0,60
1173 (900)	1,289	10,005	2,580 (92,87)	0,301	152,50	0,59
1273 (1000)	1,305	10,09	3,014 (109,21)	0,275	174,30	0,58
1373 (1100)	1,321	11,75	3,460 (124,37)	0,257	197,10	0,57
1473 (1200)	1,339	12,62	3,920 (141,27)	0,240	221,00	0,56

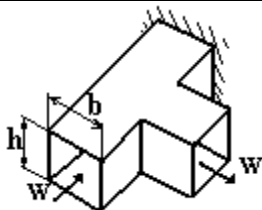
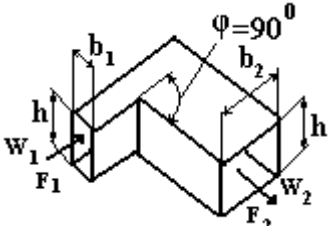
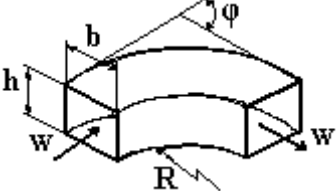
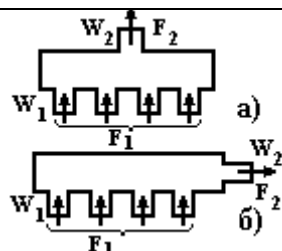
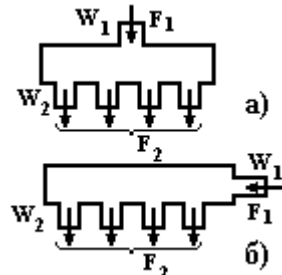
Таблиця 4.6.9-Коефіцієнти місцевого опору

№	Схема	Коефіцієнт опору	Додаток
1	2	3	4
1	<p>Вхід до каналу</p>	$\xi=0,5$	$\xi$ віднесе- но до $\omega$



Продовження таблиці 4.6.9

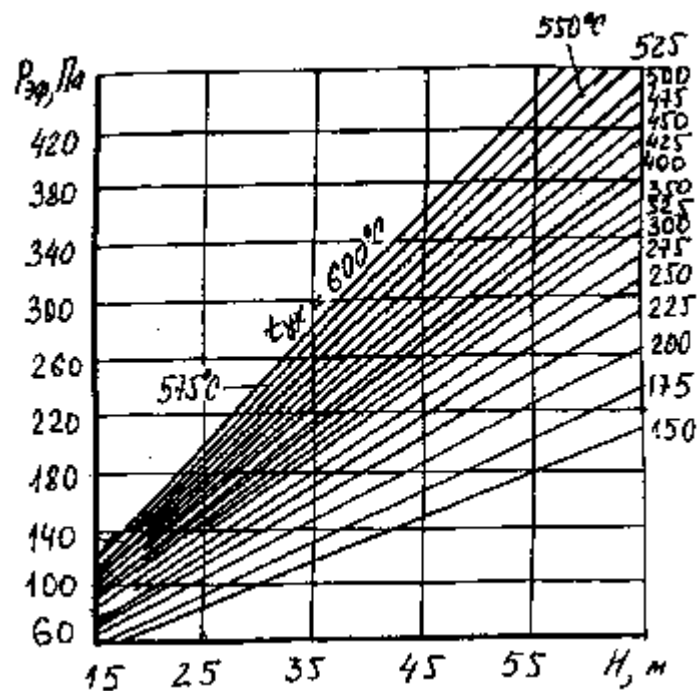
1	2	3	4																																						
2	<p>Раптове розширення</p> 	$\xi = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2$	$\xi$ віднесе-но до $\omega_1$																																						
3	<p>Конусний дифузор</p> 	$\xi = \eta \cdot \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2$ <table><tr><td><math>\varphi</math></td><td>10</td><td>20</td><td>30</td><td>40</td><td>50</td><td>60</td><td>120</td><td>180</td></tr><tr><td><math>\eta</math></td><td>0,2</td><td>0,4</td><td>0,65</td><td>0,9</td><td>1,1</td><td>1,13</td><td>1,08</td><td>1,03</td></tr></table>	$\varphi$	10	20	30	40	50	60	120	180	$\eta$	0,2	0,4	0,65	0,9	1,1	1,13	1,08	1,03	$\xi$ віднесе-но до $\omega_1$																				
$\varphi$	10	20	30	40	50	60	120	180																																	
$\eta$	0,2	0,4	0,65	0,9	1,1	1,13	1,08	1,03																																	
4	<p>Раптове звуження</p> 	$\xi = f(F_1/F_2)$ <table><tr><td><math>\frac{F_1}{F_2}</math></td><td>0,1</td><td>0,2</td><td>0,3</td><td>0,4</td><td>0,5</td><td>0,6</td><td>0,7</td><td>0,8</td><td>0,9</td></tr><tr><td><math>\xi</math></td><td>0,5</td><td>0,46</td><td>0,42</td><td>0,37</td><td>0,32</td><td>0,26</td><td>0,2</td><td>0,13</td><td>0,06</td></tr></table>	$\frac{F_1}{F_2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	$\xi$	0,5	0,46	0,42	0,37	0,32	0,26	0,2	0,13	0,06	$\xi$ віднесе-но до $\omega_1$																		
$\frac{F_1}{F_2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9																																
$\xi$	0,5	0,46	0,42	0,37	0,32	0,26	0,2	0,13	0,06																																
5	<p>Конусний дифузор</p> 	$\xi = C \cdot \left(1 - \frac{F_2}{F_1}\right)$ <table><tr><td><math>\varphi</math></td><td>20</td><td>40</td><td>60</td><td>80</td><td>120</td><td>180</td></tr><tr><td>C</td><td>0,45</td><td>0,41</td><td>0,40</td><td>0,40</td><td>0,43</td><td>0,5</td></tr><tr><td>при 0,1</td><td>0,32</td><td>0,20</td><td>0,19</td><td>0,23</td><td>0,32</td><td>0,5</td></tr><tr><td>l/d 0,6</td><td>0,20</td><td>0,10</td><td>0,13</td><td>0,17</td><td>0,29</td><td>0,5</td></tr></table>	$\varphi$	20	40	60	80	120	180	C	0,45	0,41	0,40	0,40	0,43	0,5	при 0,1	0,32	0,20	0,19	0,23	0,32	0,5	l/d 0,6	0,20	0,10	0,13	0,17	0,29	0,5	$\xi$ віднесе-но до $\omega_2$										
$\varphi$	20	40	60	80	120	180																																			
C	0,45	0,41	0,40	0,40	0,43	0,5																																			
при 0,1	0,32	0,20	0,19	0,23	0,32	0,5																																			
l/d 0,6	0,20	0,10	0,13	0,17	0,29	0,5																																			
6	<p>Коліно круглого або прямокутного розрізу</p> 	$\xi = A \cdot B \cdot C$ <table><tr><td><math>\varphi</math></td><td>20</td><td>40</td><td>60</td><td>80</td><td>90</td><td>120</td><td>180</td></tr><tr><td>A</td><td>3,0</td><td>2,0</td><td>1,5</td><td>1,25</td><td>1,25</td><td>1,25</td><td>1,25</td></tr><tr><td>B</td><td>0,1</td><td>0,2</td><td>0,4</td><td>0,8</td><td>1,0</td><td>1,9</td><td>3,0</td></tr></table> <p>Для круглих та квадратних колін C=1</p> <table><tr><td>h/b</td><td>0,5</td><td>1,0</td><td>2,0</td><td>4,0</td><td>6,0</td><td>8,0</td></tr><tr><td>C</td><td>1,1</td><td>1,0</td><td>0,9</td><td>0,8</td><td>0,75</td><td>0,7</td></tr></table>	$\varphi$	20	40	60	80	90	120	180	A	3,0	2,0	1,5	1,25	1,25	1,25	1,25	B	0,1	0,2	0,4	0,8	1,0	1,9	3,0	h/b	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	C	1,1	1,0	0,9	0,8	0,75	0,7	$\xi$ віднесе-но до $\omega$
$\varphi$	20	40	60	80	90	120	180																																		
A	3,0	2,0	1,5	1,25	1,25	1,25	1,25																																		
B	0,1	0,2	0,4	0,8	1,0	1,9	3,0																																		
h/b	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0																																			
C	1,1	1,0	0,9	0,8	0,75	0,7																																			



1	2	3	4																																														
7	Коліно з розгалуженням	$\xi = \xi'$ , де $\xi'$ - із №6	$\xi$ віднесе-но до $\omega$																																														
																																																	
8	Коліно прямокутного розрізу ( $\varphi=90^\circ$ ) із розширенням або звуженням	$\xi = f(h/b_1; b_2/b_1)$	$\xi$ віднесе-но до $\omega_1$																																														
		<table border="1"> <tr> <td rowspan="5"><math>\xi</math> при <math>h/b_1</math></td> <td><math>b_2/b_1</math></td> <td>0,6</td><td>0,8</td><td>1,0</td><td>1,2</td><td>1,4</td><td>1,6</td><td>1,8</td><td>2,0</td> </tr> <tr> <td>0,25</td> <td>1,8</td><td>1,4</td><td>1,22</td><td>1,19</td><td>1,1</td><td>1,1</td><td>1,1</td><td>1,1</td> </tr> <tr> <td>1,0</td> <td>1,8</td><td>1,35</td><td>1,15</td><td>1,05</td><td>0,95</td><td>0,9</td><td>0,85</td><td>0,8</td> </tr> <tr> <td>4,0</td> <td>1,4</td><td>1,1</td><td>0,95</td><td>0,85</td><td>0,8</td><td>0,75</td><td>0,7</td><td>0,65</td> </tr> <tr> <td>5,0</td> <td>1,4</td><td>1,0</td><td>0,8</td><td>0,7</td><td>0,65</td><td>0,6</td><td>0,55</td><td>0,5</td> </tr> </table>		$\xi$ при $h/b_1$	$b_2/b_1$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	0,25	1,8	1,4	1,22	1,19	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,8	1,35	1,15	1,05	0,95	0,9	0,85	0,8	4,0	1,4	1,1	0,95	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	5,0	1,4	1,0	0,8	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
$\xi$ при $h/b_1$	$b_2/b_1$	0,6			0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0																																						
	0,25	1,8			1,4	1,22	1,19	1,1	1,1	1,1	1,1																																						
	1,0	1,8			1,35	1,15	1,05	0,95	0,9	0,85	0,8																																						
	4,0	1,4	1,1		0,95	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65																																							
	5,0	1,4	1,0	0,8	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5																																								
9	Коліно із закругленими краями	$\xi = A \cdot B \cdot C$	$\xi$ віднесе-но до $\omega$  d-приве- дений діаметр																																														
		<table border="1"> <tr> <td><math>\varphi</math></td> <td>40</td><td>80</td><td>90</td><td>120</td><td>160</td><td></td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>0,55</td><td>0,85</td><td>1,0</td><td>1,2</td><td>1,3</td><td></td> </tr> <tr> <td>R/d</td> <td>0,1</td><td>0,2</td><td>0,3</td><td>0,4</td><td>0,5</td><td>0,6</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>0,7</td><td>0,4</td><td>0,3</td><td>0,25</td><td>0,22</td><td>0,2</td> </tr> <tr> <td>h/d</td> <td>0,5</td><td>1,0</td><td>2,0</td><td>4,0</td><td>6,0</td><td>8,0</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>1,2</td><td>1,0</td><td>0,85</td><td>0,9</td><td>0,95</td><td>1,0</td> </tr> </table>		$\varphi$	40	80	90	120	160		A	0,55	0,85	1,0	1,2	1,3		R/d	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	B	0,7	0,4	0,3	0,25	0,22	0,2	h/d	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	C	1,2	1,0	0,85	0,9	0,95	1,0				
$\varphi$	40	80		90	120	160																																											
A	0,55	0,85		1,0	1,2	1,3																																											
R/d	0,1	0,2		0,3	0,4	0,5	0,6																																										
B	0,7	0,4		0,3	0,25	0,22	0,2																																										
h/d	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0																																											
C	1,2	1,0	0,85	0,9	0,95	1,0																																											
	Короб, що збирає	$\xi = f(F_1/F_2)$	$\xi$ віднесе-но до $\omega_1$																																														
		<table border="1"> <tr> <td><math>F_1/F_2</math></td> <td>0,5</td><td>1,0</td><td>1,5</td><td>2,0</td><td>2,5</td><td>3,0</td> </tr> <tr> <td><math>\xi</math> (а)</td> <td>1,25</td><td>1,60</td><td>2,25</td><td>3,</td><td>4,25</td><td>5,5</td> </tr> <tr> <td><math>\xi</math> (б)</td> <td>1,25</td><td>1,9</td><td>2,8</td><td>4,0</td><td>5,5</td><td>7,0</td> </tr> </table>		$F_1/F_2$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	$\xi$ (а)	1,25	1,60	2,25	3,	4,25	5,5	$\xi$ (б)	1,25	1,9	2,8	4,0	5,5	7,0																									
$F_1/F_2$	0,5	1,0		1,5	2,0	2,5	3,0																																										
$\xi$ (а)	1,25	1,60	2,25	3,	4,25	5,5																																											
$\xi$ (б)	1,25	1,9	2,8	4,0	5,5	7,0																																											
11	Короб, що роздає	$\xi = f(F_1/F_2)$	$\xi$ віднесе-но до $\omega_1$																																														
		<table border="1"> <tr> <td><math>F_1/F_2</math></td> <td>0,5</td><td>1,0</td><td>1,5</td><td>2,0</td><td>2,5</td><td>3,0</td> </tr> <tr> <td><math>\xi</math> (а)</td> <td>1,0</td><td>1,5</td><td>2,25</td><td>3,5</td><td>5,0</td><td>6,0</td> </tr> <tr> <td><math>\xi</math> (б)</td> <td colspan="6">див.№10</td> </tr> </table>		$F_1/F_2$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	$\xi$ (а)	1,0	1,5	2,25	3,5	5,0	6,0	$\xi$ (б)	див.№10																														
$F_1/F_2$	0,5	1,0		1,5	2,0	2,5	3,0																																										
$\xi$ (а)	1,0	1,5	2,25	3,5	5,0	6,0																																											
$\xi$ (б)	див.№10																																																

Продовження таблиці 4.6.9

1	2	3						4
12	Шибєр у каналі	$\xi = f(h/d)$						$\xi$ віднесе-но до $\omega$
		<b>h/d</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,8</b>	<b>1,0</b>	
		$\xi$ (б)	<b>40</b>	<b>8,0</b>	<b>2,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0</b>	
		$\xi$ (а)	<b>30</b>	<b>4,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,2</b>	<b>0</b>	
13	Внутрішня поверхня гольчатих труб	$\xi = f(l)$						$\xi$ віднесе-но до $\omega$
		<b>l, мм</b>	<b>880</b>	<b>1135</b>	<b>1385</b>	<b>1640</b>		
		$\xi$	<b>1,6</b>	<b>1,9</b>	<b>2,1</b>	<b>2,4</b>		
	Пучок гольчатих труб	$\xi = \xi'(h+m)$						$\xi$ віднесе-но до швидкос-ті в пучкі
		<b>Тип труб</b>	<b>17,5</b>	<b>28</b>	<b>Без голок</b>			
		$\xi'$	<b>0,253</b>	<b>0,49</b>	<b>0,066</b>			
		<b>h-число рядів труб в напрямку руху газів; m-число секцій (ходів) рекуператору; 17,5;28-відстань між голками</b>						
14	Коридорний пучок труб	$\xi = \xi' n$ Мал. V-1, див с.354						$\xi$ віднесено до швид- кості у пучкі
15	Шаховий пучок труб	$\Delta p = C_s C_d \Delta p_{rp} (n+1)$ Мал. V-2, див с. 354						$\omega$ -дійсна швид-кість потoku
16	Трубчатий керамічний рекуператор	$\xi = f(n)$ Мал. V-3, див. с.355						-



Малюнок 4.6.10-Графік для визначення попередньої висоти труби

Таблиця 4.6.11-Абсолютна шорховатість  $\Delta$  для різних матеріалів

Матеріал труби	Стан труби	$\Delta$ , мм
Скло та кольорові метали Стальні	Нові технічно гладкі	0,001
	Нові	0,05
	Помірно іржаві	0,50
	Старі іржаві	1,0
	Оцинковані	0,5
Чавунні	Нові	0,3
	Були в роботі	1,1
	Старі	3,0
	Асбоцементні	0,085
Бетонні	Нові	0,2
	Були в роботі	0,5
	Із необробленого бетону	1,0-3,0

Таблиця 4.6.12-Фізичні параметри диму

Температура $K(^{\circ}C)$	$\rho$ , $кг/м^3$	$\lambda \times 10^{-2}$ , $Вт/(м \cdot K)$	$a \times 10^4$ , $м^2/с$ , $(\times 10^2, м^3/ч)$	$\nu \times 10^{-6}$ , $м^2/с$	Pr
1	2	3	4	5	6
273 (0)	1,293	2,44	0,188 (6,77)	13,28	0,707
323 (50)	1,093	2,83	0,258 (9,26)	17,95	0,698
373 (100)	0,946	3,22	0,337 (12,11)	23,13	0,688
423 (150)	0,846	3,58	0,425 (15,30)	28,99	0,684
473 (200)	0,746	3,93	0,514 (18,49)	34,85	0,680

Продовження таблиці 4.6.12

1	2	3	4	5	6
523 (250)	0,674	4,27	0,610 (21,96)	40,61	0,677
573 (300)	0,615	4,61	0,715 (25,76)	48,33	0,674
623 (350)	0,566	4,90	0,819 (29,47)	55,46	0,676
673 (400)	0,524	5,22	0,930 (33,52)	63,09	0,678
773 (500)	0,456	5,75	1,155 (41,51)	79,38	0,687
873 (600)	0,404	6,23	1,384 (49,78)	96,89	0,699
973 (700)	0,362	6,71	1,635 (58,82)	115,40	0,706
1073 (800)	0,329	7,18	1,885 (67,95)	134,80	0,713
1173 (900)	0,301	7,64	2,163 (77,84)	155,10	0,717
1273 (1000)	0,277	8,06	2,461 (88,53)	177,10	0,719
1373 (1100)	0,257	8,50	2,762 (99,45)	199,30	0,722
1473 (1200)	0,239	9,16	3,165 (113,94)	223,70	0,724

#### 4.7 Запитання для самоконтролю

1. Що характеризує в'язкість газів?
2. Чим відрізняється питома вага газу від її густини?
3. Що вивчає механіка пічних газів?
4. Від чого залежить геометричний тиск газу?
5. Що називають статичним тиском?
6. Що характеризує динамічний тиск газу?
7. Як вимірюють статичний та динамічний тиск газу?
8. Доведіть, що тиск газу не залежить від орієнтації поверхні у просторі?
9. Що виражає рівняння нерозривності?
10. Які параметри газу зв'язує між собою рівняння Ейлера?
11. Напишіть рівняння Бернуллі для ідеального газу.
12. Чим відрізняється рівняння Бернуллі для пічних газів від ідеальних?
13. Чому тиск газу зменшується при збільшенні висоти точки?
14. Чому переміщення частки газу відбувається без втрат зовнішньої енергії?
15. Чому у димовому тракті тиск пічних газів менше атмосферного?
16. Як уникнути вибивання пічних газів до навколишнього середовища через вікно завантаження?
17. Яким пристроєм регулюють тиск пічних газів у робочому просторі печі?
18. Чому біля основи димової труби утворюється вакуум?
19. Від яких параметрів залежить розрідження, яке створює димова труба, і яким чином?
20. Чому висоту димової труби розраховують для теплого періоду року?
21. Чому газ втрачає тиск при переміщенні по каналу?
22. Від чого залежать втрати тиску газу на тертя?
23. Що в димовому тракті служить місцевим опором?
24. В якому місці димового тракту змінюється геометричний тиск пічних газів?
25. Принцип дії відцентрового вентилятора.
26. Що характеризує ККД вентилятора?
27. Із чого складається повний перепад тиску вентилятора?
28. Як організується струмний рух газів у просторі печі?
29. Коли використовують циклонний рух пічних газів?
30. Чому фільтраційний рух пічних газів є найбільш ефективним з точки зору теплообміну?

#### 4.8 Типові задачі та їх розв'язання

**Задача 1.** Визначити втрати тиску газу на тертя при переміщенні пічного газу по борову прямокутного перерізу із розмірами  $a=0,5\text{м}$ ,  $b=0,6\text{м}$ , довжиною  $l=15\text{м}$ . Температура газів на вході до борова  $t_1=250^\circ\text{C}$ , швидкість газу  $\omega=2,4\text{ м/с}$ , густина газу  $\rho_r=1,02\text{кг/м}^3$ , матеріал кладки борову- шлакобетонні плити.

**Розв'язання.** Визначимо режим руху газу. Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu} = \frac{2,4 \cdot 0,54}{39,05 \cdot 10^{-6}} = 33188 > 10000$$

де  $d$ - гідравлічний діаметр борова, м:

$$d = \frac{4F}{\Pi} = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 0,6}{2(0,5+0,6)} = 0,54;$$

$\nu$ - кінематичний коефіцієнт в'язкості газу.

За табл.4.6.8 при  $t_1=250^\circ\text{C}$   $\nu=39,05 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ .

Режим руху турбулентний. Тоді коефіцієнт тертя

$$\mu = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d_{np}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,11 \left( \frac{1,5}{0,54} + \frac{68}{33188} \right)^{0,25} = 0,13,$$

де  $\Delta=1,5$  за табл.4.6.11.

Температура диму в кінці борова,  $^\circ\text{C}$ :

$$t_2 = t_1 - (1 \dots 2)l = 250 - 2 \cdot 15 = 220$$

Середня температура газу в борові,  $^\circ\text{C}$ :

$$t_{сер} = 0,5(t_1 + t_2) = 0,5(250 + 220) = 235$$

Втрати тиску на тертя, Па:

$$P_{тер} = \mu \frac{l}{d} \rho_r \frac{\omega^2}{2} (1 + \beta t_{сер}) = 0,13 \frac{15}{0,54} 1,02 \frac{2,4^2}{2} \left( 1 + \frac{235}{273} \right) = 14,8$$

**Задача 2.** Визначити втрати тиску на місцевому опорі, якщо в кінці борова (див. умови попередньої задачі) зробили раптове розширення борова до розмірів  $a_1=0,5\text{м}$ ,  $b_1=0,6\text{м}$ .

**Розв'язання.** Визначимо коефіцієнти місцевого опору для двох перерізів каналу:

на вході до борова:  $K_1=0,5$  (табл.4.6.9)

на розширенні:  $K_2=(1-F/F_1)^2=(1-ab/a_1b_1)^2=(1-0,5 \cdot 0,6/2 \cdot 2,4)^2=0,88$  (формула взята із табл.4.6.9).

Втрати тиску на місцевий опір, Па:

$$P_{м.о} = K_1 \rho_r \frac{\omega^2}{2} (1 + \beta t_1) + K_2 \rho_r \frac{\omega^2}{2} (1 + \beta t_2) = 0,5 \cdot 1,02 \cdot \frac{2,4^2}{2} \left( 1 + \frac{250}{273} \right) = 4,9.$$

**Задача 3.** Розрахувати об'єм пічних газів, які вибиваються через вікно камерної печі під час загрузки металу. Температура пічних газів  $T_r=1473\text{K}$ , температура зовнішнього повітря  $T_{п}=293\text{K}$ , висота вікна  $h=0,4\text{ м}$ , ширина вікна  $b=0,8\text{м}$ .

**Розв'язання.** Об'єм пічних газів, які вибиваються через вікно,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$V = \frac{2}{3} h b \sqrt{2h(\rho_{п} - \rho_r)} = \frac{2}{3} \cdot 0,4 \cdot 0,8 \sqrt{2 \cdot 0,4(1,25 - 0,24)} = 0,19$$

де  $\rho_{п}$ - густина повітря,  $\rho_{п}=1,25\text{кг/м}^3$  при  $T_{п}=293\text{K}$  за табл.1.6.10.

$\rho_{\Gamma}$ - густина газів,  $\rho_{\Gamma}=0,24 \text{ кг/м}^3$  при  $T_{\Gamma}=1473\text{K}$  за табл.4.6.8.

**Задача 4.** Визначити втрати тиску пічних газів в гольчатому рекуператорі. Число рядів труб в напрямку руху пічних газів  $h=5$ , число секцій рекуператору  $m=3$ , відстань між голками рекуператору  $a=17,5 \text{ мм}$ . Швидкість диму  $=2,5 \text{ м/с}$ , густина газу  $\rho_{\Gamma}=0,94 \text{ кг/м}^3$ , температура диму на вході до рекуператору  $t'_{\delta}=790^{\circ}\text{C}$ , на виході із рекуператора  $t''_{\delta}=520^{\circ}\text{C}$ .

**Розв'язання.** Втрати тиску на місцевий опір, Па:

$$P_{м.о} = \frac{K\omega_{\Gamma}^2\rho_{\Gamma}}{2} \left(1 + \frac{t_{сер}}{273}\right) = \frac{2,02 \cdot 2,5^2 \cdot 0,94}{2} \left(1 + \frac{655}{273}\right) = 15,8$$

де  $K$ - коефіцієнт місцевого опору. Знаходиться за рівнянням /4.6.9, додаток 13/:

$$K=K'(h+m)=0,253(5+3)=2,02$$

$t_{сер}$ - середня температура газів в рекуператорі,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$t_{сер} = 0,5(t'_{\Gamma} + t''_{\Gamma}) = 0,5(790 + 520) = 655^{\circ}\text{C}$$

**Задача 5.** Визначити продуктивність та повний тиск відцентрового вентилятора, який подає повітря до полум'яних пальників камерної печі. Кількість пальників у печі  $n=12$ шт, теоретичні витрати повітря на спалення газу  $l_0=5\text{м}^3/\text{м}^3$ , витрати газу на один пальник  $V=80,0\text{м}^3/\text{год}$ , коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha=1,1$ . Діаметр труби, по якій подається повітря  $d_1=0,07\text{м/с}$ , довжина труби  $l_1=13\text{м}$ , швидкість повітря  $\omega_1=0,07\text{м/с}$ , температура повітря  $t_{\Pi}=300^{\circ}\text{C}$ . Труба має два коліна круглого перерізу під кутом  $\varphi=80^{\circ}$ , повітря попередньо підігрівається в гольчатому рекуператорі із довжиною труб  $l_{\Gamma p}=1385\text{мм}$ , діаметром  $d_{\Gamma p}=0,3\text{м}$  та двома ходами повітря.

**Розв'язання.** Визначимо необхідний об'єм повітря (продуктивність вентилятора),  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$V = nB\alpha l_0 = 12 \cdot 80 \cdot 1,1 \cdot 5 / 3600 = 1,46 \text{ м}^3/\text{с}$$

Втрати тиску на тертя в трубі, Па:

$$P_{тер.тр} = \mu \frac{\ell_1}{d_1} \rho_{\Pi} \cdot \frac{\omega_1^2}{2} \left(1 + \frac{t_{\Pi}}{273}\right) = 0,025 \frac{13}{0,07} \cdot 0,615 \frac{12^2}{2} \left(1 + \frac{300}{273}\right) = 247,2$$

де  $\mu$ -коефіцієнт тертя. Приймається для сталевих труб  $\mu=0,25$ .

$\rho_{\Pi}$ - густина повітря,  $\rho_{\Pi}=0,615 \text{ кг/м}^3$  при температурі  $t_{\Pi}=300^{\circ}\text{C}$  за табл.1.6.10.

Втрати тиску на тертя в рекуператорі, Па:

$$P_{тер.рек} = \mu \frac{\ell_{mp}}{d_{1mp}} \rho_{\Pi} \cdot \frac{\omega_1^2}{2} \left(1 + \frac{t_{\Pi}}{273}\right) = 0,025 \frac{2 \cdot 1,385}{0,3} \cdot 0,615 \frac{12^2}{2} \left(1 + \frac{300}{273}\right) = 5,9 \text{ Па}$$

Втрати тиску на місцевий опір:

$$P_{м.о.} = (2K_1 + K_2) \rho_{\Pi} \cdot \frac{\omega_1^2}{2} \left(1 + \frac{t_{\Pi}}{273}\right) = (2 \cdot 1 + 2) \cdot 0,615 \frac{12^2}{2} \left(1 + \frac{300}{273}\right) = 3633 \text{ Па}$$

де  $K_1$ -коефіцієнт опору для коліна круглого перерізу. Визначається за табл.4.6.9, додаток 6 за рівняннями:

$$K_1 = A \cdot B \cdot C = 1,25 \cdot 0,8 \cdot 1 = 1$$

$K_2$ -коефіцієнт опору для гольчатих труб (внутрішня поверхня). Визначається за табл. 4.6.9, додаток 13 в залежності від довжини труби  $K_2=2,1$ .

Загальні втрати тиску повітря, Па:

$$P_{\Sigma} = P_{тер.тр} + P_{тер.р} + P_{м.о} = 247,2 + 5,9 + 3633 = 6164$$

**Задача 6.** Визначити висоту цегляної димової труби, яка повинна створювати розрідження  $\Delta P=310\text{Па}$ , якщо густина пічних газів  $\rho_0=1,28\text{ кг/м}^3$ , температура газів на вході до труби  $t_{\Gamma}=450^{\circ}\text{C}$ , швидкість газів на вході до труби  $\omega_{\Gamma}=2\text{м/с}$ , температура зовнішнього повітря  $t_{\Pi}=20^{\circ}\text{C}$ , кількість пічних газів  $V_{\Gamma}=5,32\text{м}^3/\text{с}$ .

**Розв'язання.** Визначимо орієнтовну висоту труби за мал. 4.6.10,

$$h_{\text{ор}}=40\text{м.}$$

Діаметр труби на вході газів,м:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4V_{\partial}}{\pi\omega_{\Gamma}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,32}{3,14 \cdot 2}} = 1,82$$

Діаметр труби на виході газів,м:

$$d_2 = \frac{d_1}{1,5} = \frac{1,82}{1,5} = 1,21$$

Середній діаметр труби,м:

$$d_{\text{сер}}=0,5(d_1+d_2)=0,5(1,82+1,21)=1,52$$

Швидкість газів на виході труби, м/с:

$$\omega_2 = \frac{4V_{\partial}}{\pi d_2^2} = \frac{4 \cdot 5,32}{3,14 \cdot 1,21^2} = 4,65$$

Середня швидкість газів, м/с:

$$\omega_{\text{ср}} = 0,5(\omega_{\Gamma} + \omega_2) = 0,5(2 + 4,65) = 3,28$$

Висота димової труби,м:

$$h = \frac{\Delta P + \rho_{\Gamma} \frac{\omega_{\Gamma}^2}{2}}{g(\rho_{\Pi} - \rho_{\Gamma}) - \mu_{\text{тер}} \rho_{\Gamma} \frac{\omega_{\text{ср}}^2}{2d_{\text{сер}}}} = \frac{310 + 0,491 \frac{2^2}{2}}{9,81(1,213 - 0,49) - 0,05 \cdot 0,491 \cdot \frac{3,28^2}{2 \cdot 1,52}} = 44,4$$

де  $\rho_{\Pi}=1,213\text{кг/м}^3$  при  $t_{\Pi}=20^{\circ}\text{C}$  за табл.1.6.10

$\rho_{\Gamma}=0,491\text{кг/м}^3$  при  $t_{\Gamma}=450^{\circ}\text{C}$  за табл.1.6.12.

**Задача 7.** Знайти абсолютний та геометричний тиск пічних газів під склепінням печі. Висота робочого простору печі  $H=1,2\text{м}$ , тиск доколійного повітря  $P_0=101,3\text{ кПа}$ , температура диму  $t_{\Gamma}=1000^{\circ}\text{C}$ , температура повітря  $t_{\Pi}=20^{\circ}\text{C}$ , густина газу та повітря при нормальних умовах  $\rho_{\Pi}=\rho_{\Gamma}=1,29\text{кг/м}^3$ .

**Розв'язання.** Абсолютний тиск газів, Па:

$$P_{\Gamma} = P_0 - P_{\text{вак}} = P_0 - \rho_{\Gamma_0} \frac{T_0}{T_{\Gamma}} gH = 101300 - 1,29 \frac{273}{1000+273} \cdot 9,8 \cdot 1,2 = 101296,7$$

Геометричний тиск газів, Па:

$$P_{\text{геом}} = gH(\rho_{\Pi} \frac{T_0}{T_{\Pi}} \rho_{\Gamma} \frac{T_0}{T_{\Gamma}}) = 9,81 \cdot 1,2 (1,29 \frac{273}{273+20} - 1,25 \frac{273}{1000+273}) = 10,9.$$

#### 4.9 Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 1.** Висота робочого простору печі  $H=1,4\text{м}$ . На рівні поду підтримується тиск пічних газів, який дорівнює атмосферному  $P_0=0,1\text{МПа}$ . Визначити абсолютний та геометричний тиск пічних газів на рівні склепіння печі, якщо температура пічних газів  $t_{\Gamma}=950^{\circ}\text{C}$ , температура повітря  $t_{\Pi}=15^{\circ}\text{C}$ , а густина газів та повітря при  $0^{\circ}\text{C}$   $\rho_{\Pi}=\rho_{\Gamma}=1,29\text{кг/м}^3$ .

*Задача 2.* Визначити втрати тиску газу на тертя при русі газу по круглій сталій трубі діаметром  $d_{\text{тр}}=0,9$  м та довжиною  $l=22$ м. Температура газів на вході до труби  $t_{\text{г}}=325^{\circ}\text{C}$ , швидкість газу  $\omega_{\text{г}}=2,9$ м/с, густина газу при  $0^{\circ}\text{C}$   $\rho_{\text{г}}=1,13$ кг/м<sup>3</sup>.

*Задача 3.* Визначити втрати тиску на місцевий опір при переміщенні газу по борову із цегли із розмірами  $a=0,8$ м,  $b=1,0$ м. Боров має два повороти під прямим кутом та раптове звуження до розмірів  $a=0,4$ м,  $b=0,8$ м. Довжина борова до звуження  $l=15$ м. Температура газів на вході до борова  $t_{\text{г}}=900^{\circ}\text{C}$ , перший поворот знаходиться на відстані 3м від входу газів, а другий на відстані 4м від першого повороту.

*Задача 4.* Визначити об'єм пічних газів, які виходять через вікно печі при завантаженні деталей. Температура печі  $t_{\text{печі}}=1300^{\circ}\text{C}$ , температура зовнішнього повітря  $t_{\text{п}}=25^{\circ}\text{C}$ , розміри вікна  $h=0,5$ м  $b=1,1$ м.

*Задача 5.* Визначити продуктивність та повний тиск вентилятора для подачі підігрітого повітря до пальників типу “труба в трубі”. Кількість пальників в печі  $n=8$ , теоретичні витрати повітря на спалення газу  $l_0=8,1$ м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha=1,13$ , продуктивність одного пальника  $V_{\text{г}}=125$ м<sup>3</sup>/год. Діаметр трубопроводу  $d_{\text{тр}}=110$  мм, довжина труби  $l_{\text{тр}}=22$ м. Повітря підігрівається в прямотрубному рекуператорі із двома ходами повітря висотою  $h=3$ м.

*Задача 6.* Визначити висоту сталій труби для виведення пічних газів від камерного сушила. Необхідне розрідження  $\Delta P=220$ Па, густина газів при  $0^{\circ}\text{C}$   $\rho_{\text{г}}=1,2$ кг/м<sup>3</sup>. Температура газів на вході до труби  $t_{\text{г}}=205^{\circ}\text{C}$ , швидкість газу на виході із труби  $\omega_{\text{г}}=3$ м/с, об'єм газів  $V_{\text{г}}=1800$ м<sup>3</sup>/год, температура зовнішнього повітря  $t_{\text{п}}=5^{\circ}\text{C}$ .

*Задача 7.* Визначити втрати тиску в прямотрубному рекуператорі із розміщенням труб у пучку за коридорною схемою. Відношення відстані між трубами  $S_2/S_1=3$ , швидкість диму  $\omega_{\text{д}}=5$ м/с, зовнішній діаметр труб рекуператора  $d=0,07$ м, середня температура диму  $t_{\text{д}}=630^{\circ}\text{C}$ , густина диму  $\rho_{\text{д}}=1,1$ кг/м<sup>3</sup>.



## 5 Паливо та його горіння. Теплогенерація за рахунок електроенергії

### 5.1 Реферат

Загальні відомості про паливо. Хімічний склад палива. Теплота згоряння палива. Характеристика твердого, рідкого та газоподібного палива. Основи теорії горіння. Горіння газоподібного палива. Загальні положення електронагрівання. Теплогенерація за рахунок прикладання різниці потенціалів до твердого тіла та рідини. Теплогенерація в робочому тілі, що знаходиться у змінному електромагнітному полі.

### 5.2 Терміни, позначення

Терміни	Літерне позначення	Одиниця виміру
Суха маса палива		%
Горюча маса палива	$G$	%
Органічна маса палива	$O$	%
Робоча маса палива	$P$	%
Теплота згоряння	$Q_H^P$	кДж/кг, кДж/м <sup>3</sup>
Температура спалахнення	$t_c$	°C
Швидкість горіння	$\omega_G$	м/с
Коефіцієнт надлишку повітря	$\alpha$	-
Дійсний об'єм повітря	$l_d$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Теоретична витрата повітря	$l_m$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
<b>Температура згоряння</b>	$t_k$	°C
Сила струму	$J$	А
Напруга струму	$U$	В
Активний опір деталі	$R$	Ом
Питомий електричний опір	$\rho$	Ом·м
Частота струму	$f$	Гц
Магнітна проникність	$\mu$	Гн/м
Глибина проникнення струму	$\Delta$	м
Реактивний опір індуктора	$X$	Ом
Потужність електрична	$N$	Вт
Магнітний потік	$\Phi$	Вб
Напруженість магнітного поля	$H$	А/м
Магнітна індукція	$B$	Тл

### 5.3 Поняття та визначення

Суха маса палива- до складу палива не входить волога.

Горюча маса палива- до складу палива не входить волога та зола.

Органічна маса палива- до складу палива входять водень, вуглець, кисень та азот.

Робоча маса палива- до складу палива крім горючої маси (включає горючу сірку та органічну масу) входять волога та азот.

Теплота згоряння- кількість теплоти, що виділяється при горінні 1кг твердого, рідинного або 1м<sup>3</sup> газового палива.

Вища теплота згоряння- враховує кількість тепла, що йде на випаровування вологи.

Нижча теплота згоряння- не враховується кількість теплоти, яка пішла на випаровування.

Температура спалахнення- температура підігрівання горючої суміші, при якій утворюється полум'я.

Горіння- процес швидкого хімічного з'єднання горючих елементів палива з окислювачем.

Кінетичний режим горіння- тривалість сумішоутворення значно менше від часу протікання безпосереднього горіння, відбувається при попередньому одержанні газоповітряної суміші.

Дифузійний режим горіння- процес сумішоутворення відбувається одночасно із процесом безпосереднього горіння.

Гомогенне горіння- відбувається у обсязі однорідної газоповітряної суміші.

Гетерогенне горіння- відбувається на поверхні частинок рідкого та твердого палива.

Швидкість горіння- швидкість поширення горіння в газоповітряній суміші.

Коефіцієнт надлишку повітря- відношення дійсного об'єму повітря до теоретичного.

Теоретичний об'єм повітря- найменша кількість повітря, необхідного згідно з розрахунками для повного згоряння одиниці палива певного складу.

Дійсний об'єм повітря- збільшений теоретичний об'єм повітря для забезпечення повного згоряння палива.

Температура згоряння- температура, якої досягли пічні гази внаслідок горіння палива.

Індукційне нагрівання- це нагрівання тіла при його розміщенні в індукторі за рахунок індукування в тілі вихрових струмів (струми Фуко).

## 5.4 Основні формули

Органічна маса палива:

$$C^0 + H^0 + O^0 + N^0 = 100\%$$

Горюча маса палива:

$$C^G + H^G + O^G + N^G + S^G = 100\%$$

Суша маса палива:

$$C^C + H^C + O^C + N^C + S^C + A^C = 100\%$$

Робоча маса палива:

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100\%$$

Теплота згоряння твердого та рідинного палива, кДж/кг:

$$Q_n^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P) - 25W^P$$

Теплота згоряння газового палива, кДж/м<sup>3</sup>:

$$Q_n^P = 108H_2 + 357CH_4 + 560C_2H_2 + 596C_2H_4 + 636C_2H_6 + 913C_3H_8 + 1185C_4H_{10} + 1465C_5H_{12} + 234H_2S + 127CO$$

Теоретичні витрати повітря на 1 кг мазуту, м<sup>3</sup>/кг:

$$l_m = 0,0476[1,867C^P + 5,6H^P + 0,7(S^P - O^P)]$$

Теоретичні витрати повітря на 1м<sup>3</sup> газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$l_m = 0,0476 \left( 0,5CO^B + 0,5H_2^B + 2CH_4^B + 3C_2H_4^B + 3,5C_2H_6^B + 5C_3H_8^B + 6,5C_4H_{10}^B + 8C_5H_{12}^B - O_2^B \right) (1 - 0,00124H_B)$$

Дійсні витрати повітря:

$$l_d = l_m \alpha$$

Вихід продуктів згоряння 1 кг мазуту, м<sup>3</sup>/кг:

$$V'_{CO_2} = 0,019 C^P$$

$$V'_{H_2O} = 0,0112 H^P + 0,0124 W^P$$

$$V'_{N_2} = 0,008 N^P + 0,79 l_d$$

Вихід продуктів згоряння 1 м<sup>3</sup> газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V'_{CO_2} = 0,01(CO^B + CO_2^B + CH_4^B + 2C_2H_4^B + 2C_2H_6^B + 3C_3H_8^B + 4C_4H_{10}^B + 5C_5H_{12}^B);$$

$$V'_{H_2O} = 0,01(H_2^B + 2CH_4^B + 2C_2H_4^B + 3C_2H_6^B + 5C_4H_{10}^B + 4C_3H_8^B + 6C_5H_{12}^B + H_2O^B \frac{0,124 d_B l_\Gamma}{1 + 0,00124 d_B});$$

$$V'_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) \frac{l_m}{1 + 0,00124 d_B};$$

$$V'_{N_2} = 0,01(N_2^B + \frac{79 l_m}{1 + 0,00124 d_B}).$$

Сумарний вихід продуктів згоряння, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_d = V'_{CO_2} + V'_{H_2O} + V'_{O_2} + V'_{N_2}.$$

Процентний склад продуктів згоряння, %:

$$CO_2 = \frac{100 V'_{CO_2}}{V_d}; \quad H_2O = \frac{100 V'_{H_2O}}{V_d};$$

$$O_2 = \frac{100 V'_{O_2}}{V_d}; \quad N_2 = \frac{100 V'_{N_2}}{V_d}.$$

Густина газу, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_\Gamma = \frac{1}{2240} (16CH_4^B + 28C_2H_2^B + 20C_2H_6^B + 44C_3H_8^B + 58C_4H_{10}^B + 72C_5H_{12}^B + 2H_2^B + 28CO^B + 44CO_2^B + 28N_2^B + 18H_2O^B + 32O_2^B).$$

Густина продуктів згоряння, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_d = \frac{1}{2240} (44CO_2 + 28N_2 + 18H_2O + 32O_2).$$

Теплозміст повітря, кДж/м<sup>3</sup>:

$$i_\Pi = l_d t_\Pi C_\Pi / V_d.$$

Теплозміст газу, кДж/м<sup>3</sup>:

$$i_{\Gamma} = \frac{0,01t_{\Gamma}}{V_{\delta}} (CH_4^B \cdot C_{CH_4} + C_2H_4^B \cdot C_{C_2H_4} + C_2H_6^B \cdot C_{C_2H_6} + C_3H_8^B \cdot C_{C_3H_8} + C_3H_{10}^B \cdot C_{C_3H_{10}} + \\ + C_5H_{12}^B \cdot C_{C_5H_{12}} + H_2^B \cdot C_{H_2} + CO^B \cdot C_{CO} + CO_2^B \cdot C_{CO_2} + N_2^B \cdot C_{N_2} + O_2^B \cdot C_{O_2})$$

Калометрична температура згоряння, °С:

$$t_K = \frac{1}{CV_{\delta}} (Q_{\Pi}^P + Q_{III}^{\Phi} + Q_{\Pi}^{\Phi})$$

Теоретична температура згоряння, °С:

$$t_T = \frac{1}{CV_{\delta}} (Q_{\Pi}^P - Q_{\text{дис}})$$

Дійсна температура згоряння, °С:

$$t_{\delta} = \frac{1}{CV_{\delta}} (Q_{\Pi}^P - Q_{\text{дис}} - Q_{BT})$$

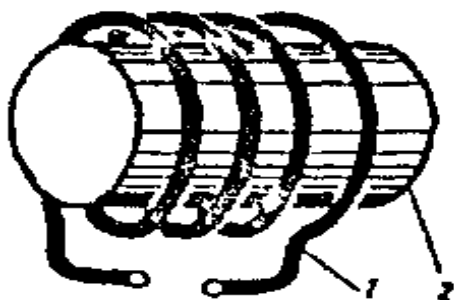
Глибина проникнення струму, м:

$$\Delta = 503 \sqrt{\rho / (\mu \cdot f)}$$

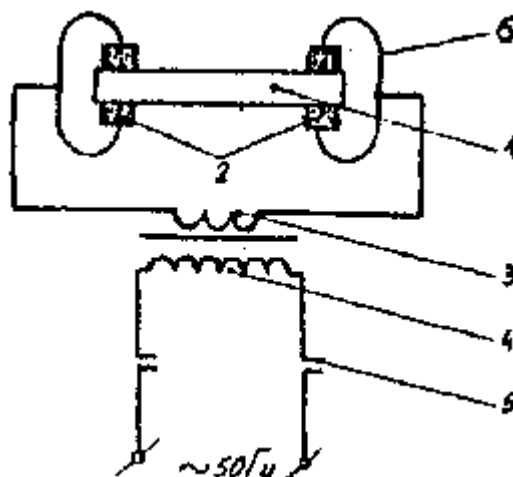
Кількість теплоти при електроконтактному нагріванні, Дж:

$$Q = J^2 R \tau.$$

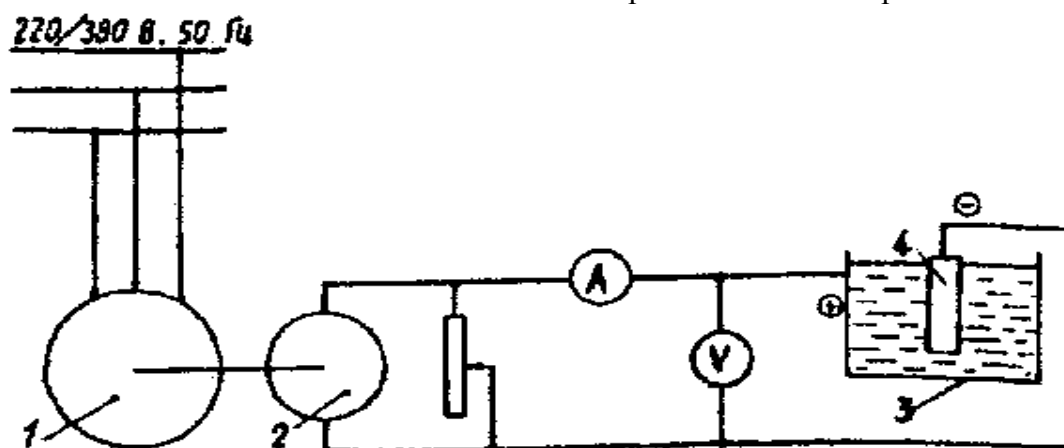
## 5.5 Малюнки, графіки, таблиці



Малюнок 5.5.1-Схема індукційного нагрівання



Малюнок 5.5.2-Принципальна схема електроконтактного нагрівання



Малюнок 5.5.3-Схема устновки для нагрівання в електроліті

Таблиця 5.5.4.1-Ентальпія повітря

Температура підогріву, °С	200	250	300	350	400
Ентальпія повітря, $C_B$ , кДж/(м³·К)	1,310	1,315	1,320	1,325	1,330

Таблиця 5.5.4.2-Ентальпія продуктів згоряння палива

Температура, °С	$i_{CO_2}$	$i_{H_2O}$ , кДж/м³	$i_{N_2}$	$i_{O_2}$
1	2	3	4	5
1400	3256,3	2536,3	2021,9	2133,5
1500	3520,0	2570,9	2180,6	2298,2
1600	3784,6	2977,4	2337,6	2463,2
1700	4049,7	3204,6	2496,7	2629,8
1800	4316,8	3430,4	2660,2	2801,5
1900	4584,8	3656,1	2818,7	2974,9
2000	4852,7	3889,7	2971,0	3146,6
2100	5124,0	4127,5	3142,7	3315,3
2200	5397,0	4362,8	3309,0	3485,7

Продовження таблиці 5.5.4.2

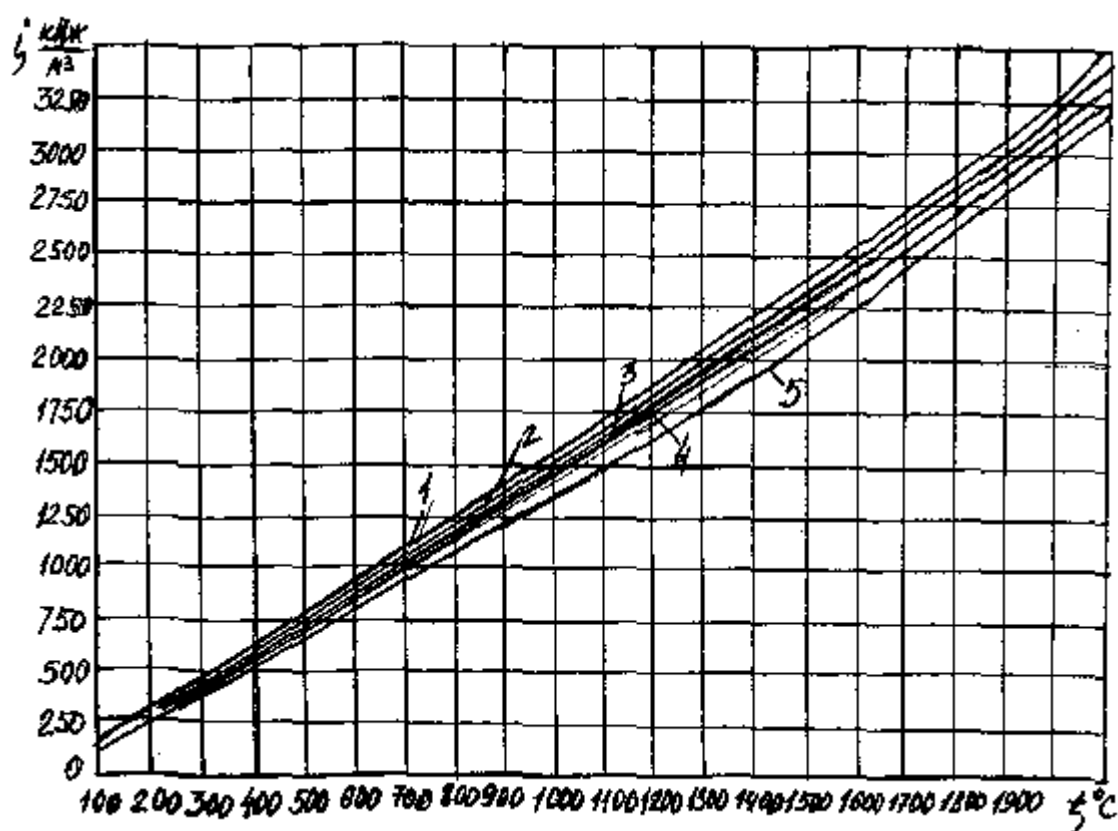
1	2	3	4	5
2300	5669,2	4601,5	3472,3	3661,1
2400	5937,2	4840,1	3636,4	3838,2
2500	6213,5	5078,8	3802,2	4012,3
2600	6481,4	5325,8	3968,8	4194,2
2700	6753,6	5564,5	4131,3	4362,8
2800	7002,4	5723,6	4294,5	4514,2

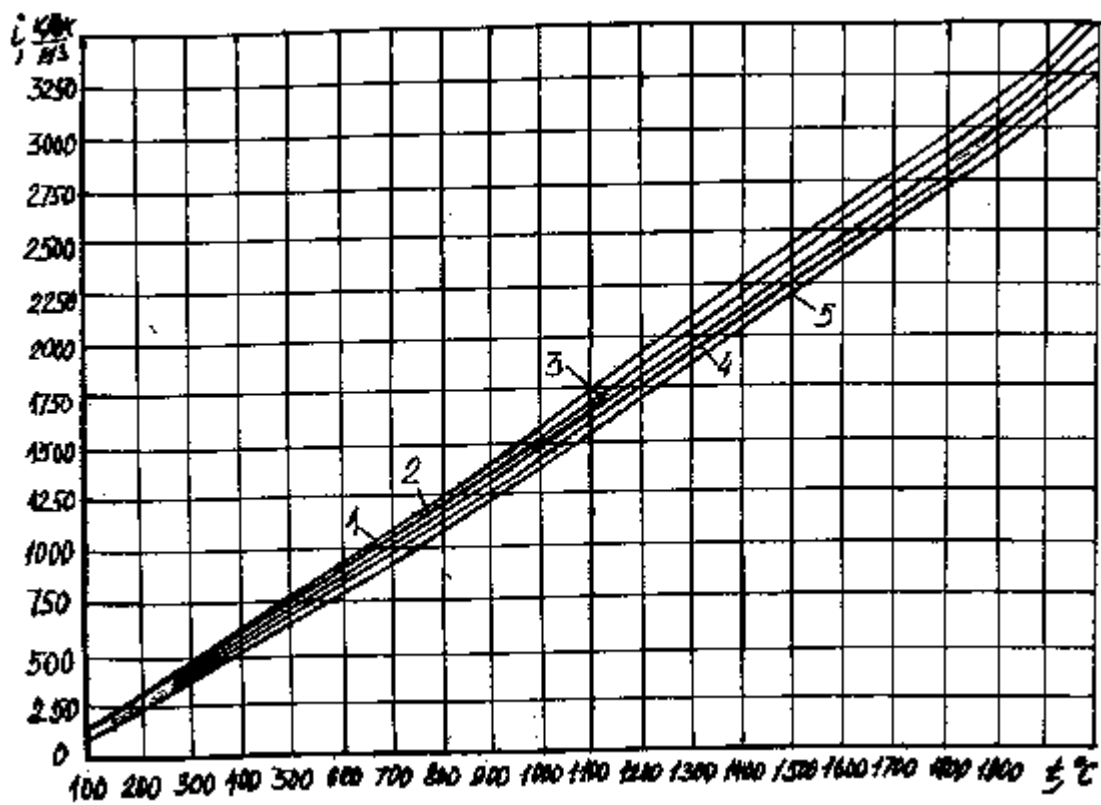
Таблиця 5.5.5-Теплозміст газів

Темпе- ратура °C	Газ									
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Повіт- ря	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	171,3	150,0	130,0	130,0	132,3	129,2	130,2	182,0	160,9	210,1
200	360,6	302,4	261,9	261,6	267,2	259,6	261,5	379,2	349,4	465,9
300	563,9	418,7	395,7	394,6	409,4	390,6	395,7	589,5	563,2	759,5
400	777,1	623,4	533,0	530,1	551,4	521,7	532,2	810,2	800,7	1080,0
500	1001,1	690,2	672,4	667,8	699,6	654,0	671	1037,9	1060,2	1447,0
600	1236,4	964,3	814,7	889,4	850,8	785,9	802,2	1272,4	1341,8	1830,5
700	1475,1	1143,0	959,0	950,9	1004,5	919,5	960,7	1510,7	1549,5	2233,8
800	1718,8	1328,9	1106,9	1098,7	1160,5	1086,9	1110,3	1751,8	1968,3	2675,5
900	1967,5	1526,8	1259,4	1247,7	1320,2	1041,3	1261,1	1997,6	2300,3	2991,2
1000	2219,5	1721,0	1412,3	1399,3	1479,7	1330,2	1414,4	2243,8	2647,0	3564,8
1100	2476,6	1910,9	1564,9	1553,8	1629,0	1469,6	1570,1	2655,5	-	-
1200	2732,8	2113,6	1721,7	1708,3	1802,5	1614,5	1726,3	2738,3	-	-
1300	2992,4	2321,1	1879,5	1862,8	1970,0	1758,5	1926,8	2994,9	-	-
1400	3256,3	2536,3	2038,6	2021,9	2133,5	1904,2	2042,8	3246,2	-	-
1500	3520,0	2750,9	2272,7	2180,6	2298,2	2072,5	2199,8	3497,4	-	-
1600	3784,6	2977,4	2355,6	2337,6	2463,2	2200,3	2361,5	3747,4	-	-
1700	4049,7	3204,6	2515,5	2496,7	2629,8	2350,5	2521,8	4005,3	-	-
1800	4316,8	3430,4	2677,2	2660,0	2801,5	2505,5	2683,9	4262,4	-	-
1900	4584,8	3656,1	2836,3	2818,7	2974,9	2658,7	2847,2	4932,3	-	-
2000	4852,7	3889,7	3000,4	2871,0	3146,6	2813,7	3007,9	4651,7	-	-
2100	5124,8	4127,5	3162,4	3142,7	3315,3	2970,2	3174,2	5024,4	-	-
2200	5397,0	4362,8	3321,1	3309,0	3485,7	3132,3	3337,5	5284,0	-	-
2300	5669,2	4601,5	3510,3	3472,3	3661,1	3291,8	3502,4	5539,4	-	-
2400	5937,2	4840,1	3650,2	3636,4	3838,2	3452,6	3667,8	5799,0	-	-
2500	6213,5	5078,8	3820,6	3802,2	4012,3	3615,5	3834,8	6054,4	-	-
2600	6481,4	5325,8	3983,5	3968,8	4191,2	3779,1	4002,7	6309,8	-	-
2700	6753,6	5564,5	4151,8	4131,3	4362,8	3940,0	4166,9	6569,4	-	-

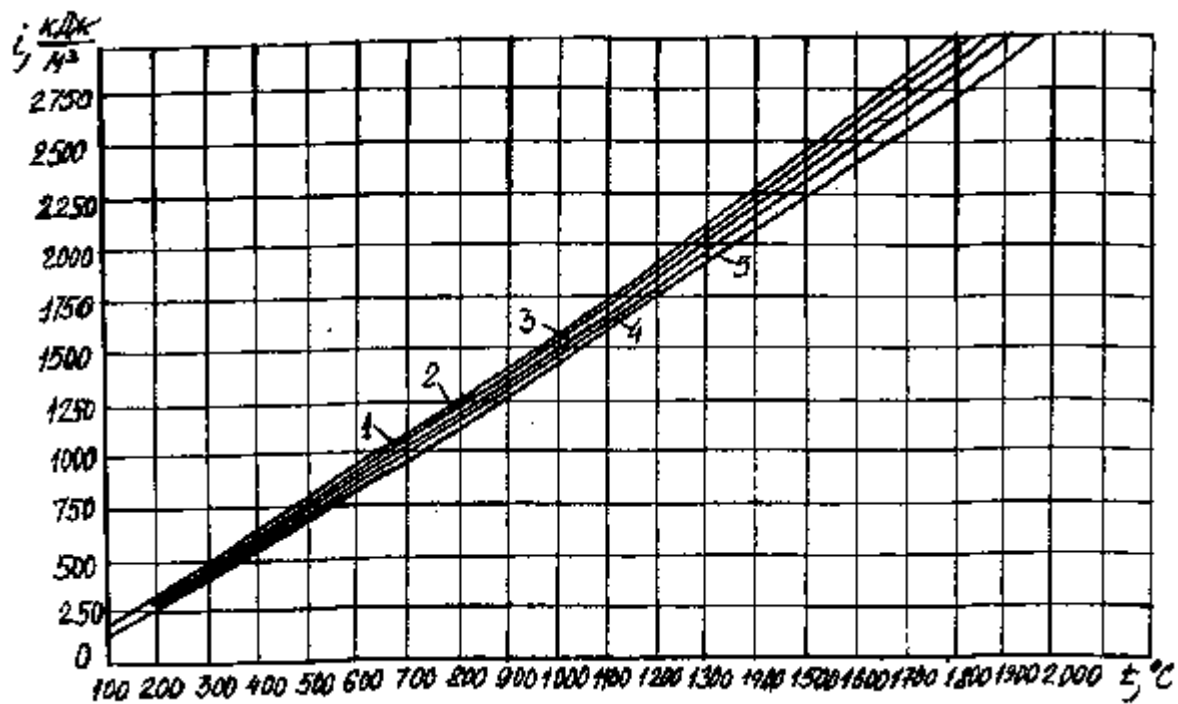
Таблиця 5.5.6-Теплоємність компонентів газу

Компоненти газу	Теплоємність, кДж/(м <sup>3</sup> ·К) при температурі, °С						
	100	150	200	250	300	350	400
CH <sub>4</sub>	2,448	2,628	2,807	3,041	3,175	3,352	3,529
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,827	2,001	2,171	2,327	2,478	2,607	2,736
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,067	2,278	2,490	2,680	2,870	3,042	3,214
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2,016	2,237	2,458	2,646	2,834	2,997	3,161
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,027	2,241	2,456	2,635	2,815	2,972	3,129
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	2,025	2,236	2,448	2,624	2,799	2,953	3,108
H <sub>2</sub>	14,45	14,47	14,50	14,52	14,53	14,56	14,58
CO	1,044	1,051	1,058	1,069	1,080	1,093	1,106
CO <sub>2</sub>	0,914	0,953	0,993	1,027	1,057	1,078	1,110
N <sub>2</sub>	1,034	1,038	1,043	1,051	1,060	1,070	1,082
O <sub>2</sub>	0,933	0,948	0,963	0,978	0,994	1,009	1,034

Малюнок 5.5.7-і-т діаграма для газів із  $Q_H^P > 12000$  кДж/м<sup>3</sup>



Малюнок 5.5.8-і- $t$  діаграма для газів із  $Q_H^p > 8...12$  МДж/м³



Малюнок 5.5.9-і- $t$  діаграма для газів із  $Q_H^p > 8000$  кДж/м³



## 5.6 Запитання та завдання для самоконтролю

1. Що включає горюча маса палива?
2. Що входить до сухої маси палива?
3. Чим відрізняється органічна маса палива від горючої?
4. Що входить до робочої маси палива?
5. Що називається теплотою згоряння?
6. Чим відрізняється нижча температура згоряння від вищої?
7. Що називають температурою спалахнення?
8. Що представляє собою горіння палива?
9. Чим характеризується кінетичний режим горіння?
10. Коли виникає дифузійний режим горіння?
11. При яких умовах протікає гомогенне горіння?
12. Що називають гетерогенним горінням?
13. Що називають швидкістю горіння?
14. Що показує коефіцієнт надлишку повітря?
15. Як визначається теоретичний об'єм повітря?
16. Що називають дійсним об'ємом повітря?
17. Як визначається температура згоряння?
18. Принцип дії індукційного нагрівання.
19. Переваги та недоліки електроконтактного нагрівання.
20. Механізм нагрівання деталей в електроліті.
21. Характеристика твердого палива.
22. Характеристика газоподібного палива.
23. Характеристика рідкого палива.
24. За рахунок чого нагрівається деталь у розплаві солі?
25. Як підвищити ефективність індукційного нагрівання?
26. Які гази входять до складу продуктів згоряння?
27. Переваги електронагрівання перед нагріванням за рахунок згоряння палива.

## 5.7 Типові задачі з розв'язанням

**Задача 1.** Визначити робочу масу сухого газу, який містить  $CO=25\%$ ,  $CO_2=63\%$ ,  $N_2=12\%$ , та має вологість  $W=30\text{г/м}^3$ .

**Розв'язання.** Зміст води в газі, %:

$$H_2O = \frac{100W}{8036 + W} = \frac{100 \cdot 30}{8036 + 30} = 3,6$$

Коефіцієнт перерахунку із сухого палива на вологе:

$$K = \frac{100 - H_2O}{100} = \frac{100 - 3,6}{100} = 0,964$$

Склад вологого газу, %:

$$CO^B = kCO = 0,964 \cdot 25 = 24,1 \quad CO_2^B = kCO_2 = 0,964 \cdot 63 = 60,73$$

$$N_2^B = kN_2 = 0,964 \cdot 12 = 11,57 \quad H_2O^B = 3,6$$

**Задача 2.** Визначити робочу масу мазуту. Склад мазуту, %:  $C^C=50,0$ ;  $H^C=9,5$ ;  $S^C=0,5$ . Вологість мазуту  $W=5\%$ .

**Розв'язання.** Склад робочої маси мазуту, %:

$$C^P = C^C \frac{100 - W}{100} = 90 \frac{100 - 5}{100} = 85,52$$

$$H^P = H^C \frac{100 - W}{100} = 9,5 \frac{100 - 5}{100} = 8,99$$

$$S^P = S^C \frac{100 - W}{100} = 0,5 \frac{100 - 5}{100} = 0,49$$

**Задача 3.** Визначити теплоту згоряння мазуту, який містить: 86,5% C<sup>P</sup>, 10,5% H<sup>P</sup>, 0,3% O<sup>P</sup>, 0,3% S<sup>P</sup>, 1,8% W<sup>P</sup>.

**Розв'язання.** За рівнянням Д.І. Менделєєва знаходимо нижчу теплоту згоряння мазуту:

$$\begin{aligned} Q_H^P &= 339,1C^P + 1256H^P - 108,9(O^P - S^P) - 25(W^P + 9H^P) = \\ &= 339,1 \cdot 86,5 + 1256 \cdot 10,5 - 108,9(0,3 - 0,3) - 25(1,8 + 9 \cdot 10,5) = 40045 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

**Задача 4.** Визначити теплоту згоряння природного газу, який містить:

$$94\%CH_4^B, \quad 2,0\%C_2H_6^B, \quad 1,0\%C_3H_8^B, \quad 0,4\%C_4H_{10}^B,$$

$$0,2\%CO_2^B, \quad 0,5\%N_2^B, \quad 1,9\%H_2O^B.$$

**Розв'язання.** Визначимо теплоту згоряння:

$$\begin{aligned} Q_H^P &= 358CH_4^B + 636C_2H_6^B + 913C_3H_8^B + 1185C_4H_{10}^B = \\ &= 358 \cdot 94,0 + 636 \cdot 2,0 + 913 \cdot 1,0 + 1185 \cdot 0,4 = 36328 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \end{aligned}$$

**Задача 5.** Визначити об'єм та склад продуктів згоряння коксодоменного газу. Склад вологого газу, %:  $CH_4^B = 11,15$ ,  $CO^B = 18,68$ ,  $H_2^B = 25,16$ ,  $CO_2^B = 6,19$ ,  $N_2^B = 34,12$ ,

$H_2O^B = 4,74$ . Теоретичний об'єм повітря  $l_T = 2,02 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , дійсний об'єм повітря  $l_d = 2,39 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , вологість повітря  $d_B = 10 \text{ г}/\text{м}^3$ .

**Розв'язання.** Об'єм складових продуктів згоряння,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ :

$$V'_{CO_2} = 0,01(CO^B + CO_2^B + CH_4^B) = 0,01(18,68 + 6,19 + 11,15) = 0,36;$$

$$\begin{aligned} V'_{H_2O} &= 0,01(H_2^B + 2CH_4^B + H_2O^B \frac{d_B l_T 0,124}{1 + 0,00124 d_B}) = \\ &= 0,01(25,16 + 2 \cdot 11,15 + 4,74 \frac{10 \cdot 2,08 \cdot 0,124}{1 + 0,00124 \cdot 10}) = 0,595; \end{aligned}$$

$$V'_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) \frac{l_d}{1 + 0,00124 d_B} = 0,21(1,15 - 1) \frac{2,39}{1 + 0,00124 \cdot 10} = 0,074;$$

$$V'_{N_2} = 0,01(N_2^B + \frac{79 l_d}{1 + 0,00124 d_B}) = 0,01(34,12 + \frac{79 \cdot 2,39}{1 + 0,00124 \cdot 10}) = 2,2.$$

Об'єм продуктів згоряння,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ :

$$V_d = V'_{CO_2} + V'_{H_2O} + V'_{O_2} + V'_{N_2} = 0,36 + 0,595 + 0,074 + 2,2 = 3,229.$$

**Задача 6.** Визначити густину продуктів згоряння газу, який містить:

$$11,12\%CO_2, \quad 68,1\%N_2, \quad 18,4\%H_2O, \quad 2,29\%O_2.$$

**Розв'язання.** Густина продуктів згоряння,  $\text{кг}/\text{м}^3$ :

$$\rho_{\partial} = \frac{1}{2240}(44CO_2 + 18H_2O + 28N_2 + 32O_2) =$$

$$= \frac{1}{2240}(44 \cdot 11.12 + 18 \cdot 18.4 + 28 \cdot 68.1 + 32 \cdot 2.29) = 1.25.$$

**Задача 7.** Визначити температуру згоряння природного газу, який має теплоту згоряння 32200 кДж/м<sup>3</sup>. Об'єм продуктів згоряння  $V_d = 11,6 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , дійсний об'єм повітря  $l_{\partial} = 9,7 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , температура підігрівання повітря  $t_n = 300^\circ\text{C}$ .

**Розв'язання.** Визначимо теплотміст продуктів згоряння, кДж/м<sup>3</sup>:

$$i_{\partial} = \frac{Q_H^P}{V_{\partial}} = \frac{32200}{11,6} = 2777.$$

Теплотміст підігрітого повітря, кДж/м<sup>3</sup>:

$$i_{II} = \frac{l_{\partial} \cdot t_B \cdot c_B}{V_{\partial}} = \frac{9,7 \cdot 300 \cdot 1,32}{11,6} = 330$$

де  $c_B = 1,32 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$  за табл. 1.6.10.

Загальний зміст продуктів згоряння, кДж/м<sup>3</sup>:

$$i_n = i_{\partial} + i_{II} = 2777 + 330 = 3107$$

Згідно із даними табл. 5.5.4. для третьої групи палив ( $Q_H^P > 12000 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$ ) для  $i_{II} = 3107 \text{ кДж}/\text{м}^3$  знаходимо температуру згорення:  $t = 1900^\circ\text{C}$ .

## 5.8 Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 1.** Визначити робочу масу сухого природного газу. Склад газу, %:  $\text{CH}_4 = 88,6$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 1,0$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,2$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,09$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,06$ ;  $\text{CO}_2 = 0,05$ ;  $\text{N}_2 = 10,0$ . Вологість газу  $W = 40 \text{ г}/\text{м}^3$ .

**Задача 2.** Визначити робочу масу мазуту, який містить: 92% C<sup>C</sup>, 6,5% H<sup>C</sup>, 1,0% O<sup>C</sup>. вологість мазуту  $W^P = 6\%$ .

**Задача 3.** Визначити теплоту згоряння мазуту, який містить: 82,8% C<sup>P</sup>, 11,6% H<sup>P</sup>, 0,4% O<sup>P</sup>, 0,8% S<sup>P</sup>, 0,8% N<sup>P</sup>, 0,2% A<sup>P</sup>, 3,4% W<sup>P</sup>.

**Задача 4.** Визначити теплоту згоряння генераторного газу, який містить: 0,9%  $\text{CH}_4$ , 1,2%  $\text{H}_2$ , 35% CO, 62,1%  $\text{N}_2$ . Вологість газу  $W = 15 \text{ г}/\text{м}^3$ .

**Задача 5.** Визначити дійсний об'єм продуктів згоряння генераторного газу (склад газу взяти із задачі 4).

**Задача 6.** Визначити густину продуктів згоряння природного газу. Склад продуктів згоряння: 12,8%  $\text{CO}_2$ ; 19,2%  $\text{H}_2\text{O}$ ; 1,2%  $\text{O}_2$ ; 65,8%  $\text{N}_2$ .

**Задача 7.** Визначити температуру згоряння доменного газу, який має теплоту згоряння  $Q_H^P = 4100 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$ . Об'єм продуктів згоряння  $V_{\partial} = 2,6 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , дійсний об'єм повітря  $l_{\partial} = 1,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , температура підігрітого повітря  $t = 350^\circ\text{C}$ .

## 6 Матеріали та будівельні елементи печей

### 6.1 Реферат

Визначення вогнетривких матеріалів. Вимоги до вогнетривів. Класифікація вогнетривів. Способи виготовлення вогнетривів. Пористість вогнетривів. Вогнетривкість та її визначення. Газопроникність та теплопровідність вогнетривів. Гранична температура використання. Визначення термічної стійкості. Густина та шлакостійкість вогнетривів. Питома теплоємність та теплопровідність. Схеми виготовлення кремнеземних та, алюмосилікатних, магнезитових вогнетривів. Вогнетривкі розчини та набивальні маси. Теплоізоляційні матеріали. Будівельні матеріали та метали. Фундаменти та футерівка печей. Арочні та підвісні склепіння. Металеві конструкції печей.

### 6.2 Терміни, позначення

Терміни	Літерне позначення	Одиниця виміру
Вогнетривкість	<i><b>B</b></i>	°C
Термічна стійкість	<i><b>m</b></i>	Число тепловзмін
Пористість	<i><b>P</b></i>	%
Механічна міцність	<i><b>M</b></i>	МПа
Гранична температура використання	<i><b>t<sub>гр</sub></b></i>	°C
Шлакостійкість	<i><b>Ш</b></i>	%

### 6.3 Поняття та визначення

Вогнетривкі матеріали - це неметалічні матеріали та вироби, що можуть працювати при температурі, не нижчій від 1580°C.

Природні вогнетриви – вирізаються безпосередньо із гірських порід.

Штучні вогнетриви – одержують пресуванням, трамбуванням або литтям.

Вогнетривкість – це властивість матеріалу протистояти тривалій дії високої температури без розплавлення та деформування.

Термічна стійкість – це здатність матеріалу витримувати різкі коливання температури без появи на їх поверхні щілин або інших ознак руйнування.

Механічна міцність вогнетривів – це властивість витримувати тиск без руйнування.

Пористість вогнетривів – це відносний об'єм пор у виробі.

Шлакостійкість – це здатність вогнетривів чинити опір руйнуванню внаслідок дії пічних газів, шлаків, окалини тощо.

Гранична температура використання – це температура, при якій розміри вогнетрива зменшуються більш як на 40%.

Теплоізоляційні матеріали – це матеріали. Які мають низьку теплопровідність та високу пористість.

## 6.4 Малюнки, графіки, таблиці

Таблиця 6.4.1-Властивості вогнетривів та теплоізоляційних матеріалів

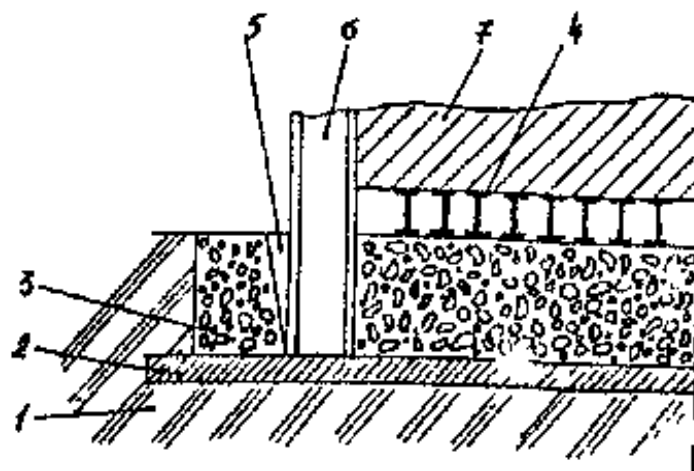
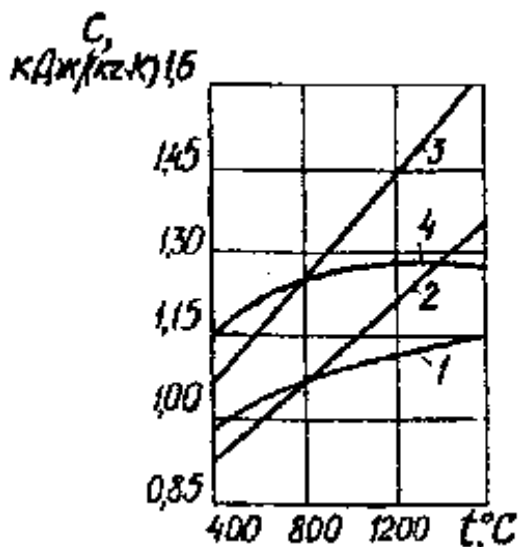
Матеріал	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c_p$ , Дж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Темпера- тура викорис- тання, °С
1	2	3	4	5
Динас звичайний	0,815+0,00067t	870+0,193t	1900-2000	1620
Динас високої густини	1,58+0,00038t	870+0,193t	2000-2100	1660
Шамот	0,7+0,00064t	865+0,210t	1800-2000	1300
Шамот класу А	0,88+0,0023t	865+0,210t	1800-1900	1350
Багатошамотні вироби	10,4+0,00015t	865+0,210t	2300-2800	1400
Каолін густий	1,75+0,00086t	865+0,210t	2400-2500	1400
Напівкислі вироби	0,71+0,00070t	868+0,190t	2350-2500	1430
Глиняна цегла	0,465+0,0052t	-	1600	-
Багатоглиноземні:				
ВГО-45	0,84+0,00058t	835+0,250t	2200	1550
ВГО-62	1,76-0,00023t	835+0,250t	2400	1600
ВГО-72	1,76-0,00023t	835+0,250t	2500	1700
Мулїт та корунд на глиняній зв'язці	2,1+0,0018t	795+0,210t	2700-2900	1500
Мулїт ливарний	28-0,023t	835+0,210t	3300	1700
Корунд ливарний	58-0,029t	880+0,210t	3800	1850
Магнезит	6,28-0,0027t	1050+0,145t	2600-2800	1580
Солодомїт	1,86-0,00078t	1000	2700-2850	1800
Форстерїт звичайний	1,63-0,00040t	900+0,210t	2350-2500	1620
Форстерїт насадочний	4,23-0,0016t	900+0,210t	2350-2500	1620
Шпїнель	5,1-0,035t	880	2850-2900	1700
Тальк	1,05+0,00031t	677	2000	1350
Хромомагнезит	2,8-0,00087t	920	2700-2850	1520
Магнезитохромїт	4,1-0,0016t	920	2800-2900	>1500
Периклазошпїнелїднї	4,17-0,0011t	920	3100-3150	>1600
Цирконїй	1,3+0,00064t	540+0,12t	3300	1600
Циркон	2,1-0,00093t	530+0,125t	3100-3400	1600
Карборунд:				
рефракс	37,1-0,0344t	960+0,145t	2100	>2500
карбофракс	2,62-0,00116t	1100	2100	>2000
Графїт:				
20% С	3,7	835	1800-1900	>2500
50% С	5,42	835	1800-1900	>2500
Вуглець	3,14+0,0021t	-	1350-1650	>2500
Вуглець графїтизований	7,9+0,014t	-	1350-1650	>2500

Продовження таблиці 6.4.1

1	2	3	4	5
Вогнетривкий бетон:				
наповнювач-шамот, динас	~0,45	850	1850	>1700
наповнювач-хроміт	1,97 при 400 <sup>0</sup> С 3,02 при 800 <sup>0</sup> С	850	2350	1770
Шлакобетон	0,7	800	1500	-
Залізобетон набивний	1,55	840	2200	-
Шамот легковаговий:				
ШЛБ-0,4	0,116+0,00016t	960	400	1100
ШЛБ-0,8	0,225+0,00022t	960	800	1200
ШЛБ-1,0	0,314+0,00035t	960	1000	1300
ШЛБ-1,3	0,465+0,00038t	960	1300	1300
Дирас легковаговий				
ДиЛ-1,0	0,29+0,00037t	960	1000	1430
Високоглинозем легковаговий	0,7	960	1300-1350	1400
Карборунд легковаговий	0,93-1,62	950	1400	1600
Диатомітова цегла	0,116+0,00015t	920	500	-
Диатоміт:				
природний	0,163+0,00043t	920	444	1000
молотий	0,091+0,00028t	920	400-500	900
Зоноліт(вермикуліт)	0,072+0,00026t	950	150-250	1100
Вермикулітові плити	0,081+0,00023t	1000	250	600
Трепел сухий, порошок	0,105+0,00028t	880	900	900
Асбестовий картон	0,157+0,00014t	835	1000-1250	450
Асбозуріт	0,162+0,00017t	-	450	600
Піношамот	0,28+0,00023t	880	950	-
»	0,10+0,000145t	850	600	-
Піондинас	0,8	92	680	-
Ультралегковий	0,14-0,24	835	280	-
Піноглинозем	1,65	920	960	-
Пінобетонні блоки	0,099-0,122	-	400-500	850
Пінодіатоміт	0,093+0,00020t	-	230-430	-
Піноскло	0,124-0,16	-	290-450	-
Скловолокно	0,029+0,00029t	-	100-200	450
Шлакова вата				
марки 200	0,048+0,00014t	1050	<200	500
Мінеральна вата	0,053+0,00018t	920	125	600
Мінеральний войлок	0,058-0,076	920	250-300	-
Каолінова вата ВК	0,03+0,0002t	870+0,21t	100	1100

Продовження таблиці 6.4.1

1	2	3	4	5
Плити із каолінової вати	0,12+0,0016t	870+0,21t	400	1100
Плити напівжорсткі із мінеральної вати	0,05+0,0002t	920	150	400
Перліт вспучений (засипка)	0,06+0,000116t	920	150	900
Совелітовий порошок (засипка)	0,1+0,000116t	920	500	500



Малюнок 6.4.2-Залежність питомої теплоємності різних вогнетривів

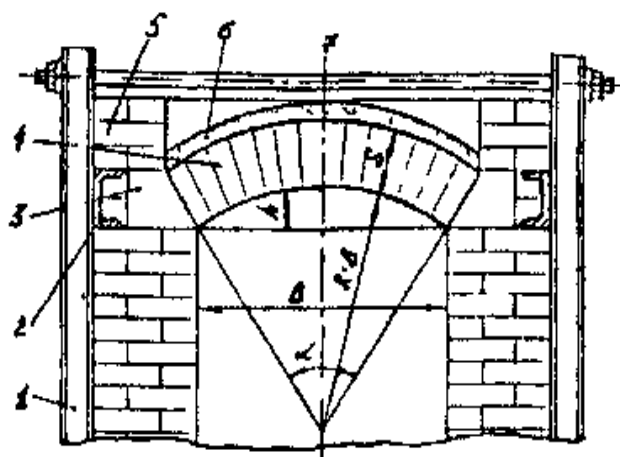
Малюнок 6.4.4-Фундамент печі

Таблиця 6.4.3-Рекомендації для вибору товщини футеровки печей

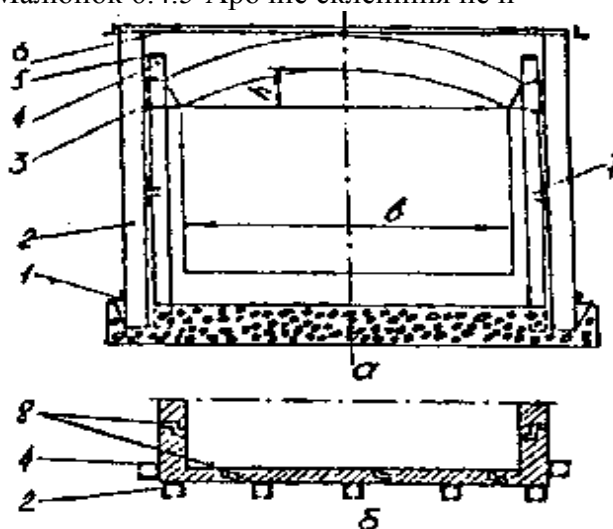
Елементи кладки	Температура, °C	Внутрішній шар		Шар теплоізоляції	
		Товщина кладки, мм	Матеріал	Товщина, мм	Матеріал
1	2	3	4	5	6
Стіни висотою до 1м	до 1200	120	шамот класу В	250	трепелова або діамітова цегла
Теж саме, більше 1м	1200	250	теж саме	250	теж саме
» » до 1м	вище 1200	230	шамот класу Б	120-250	» »
» » більше 1м	» 1200	230-350	» » А	120-250	» »
Склепіння печей із шириною до 1м	до 1000	120	» » Б	120-150	ізоляційна засипка
Теж саме, до 3,5м	до 1000	230	теж саме	150-200	теж саме
» » більше 3,5м	до 1000	300	» »	150-200	» »

Продовження таблиці 6.4.3

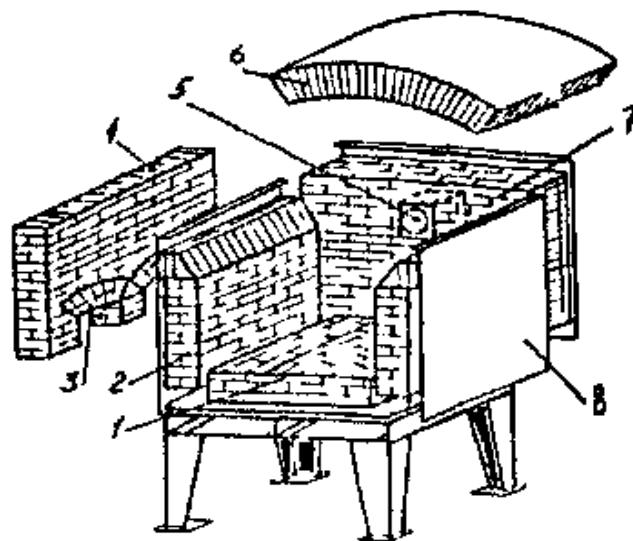
1	2	3	4	5	6
Склепіння пе-чей із шири-ною до 1м	1000-1200	120	шамот класу А	120-150	ізоляційна засипка
теж саме, до 3,5м	1000-1200	230	теж саме	150-200	теж саме
» » більше 3,5м	1000-1200	300	» »	150-200	» »
теж саме, до 1м	вище 1200	230	» »	120-150	» »
» » » 3,5м	» 1200	300	динас або шамот класу А	150-200	» »
» » більше 3,5м	» 1200	300	теж саме	150-200	» »



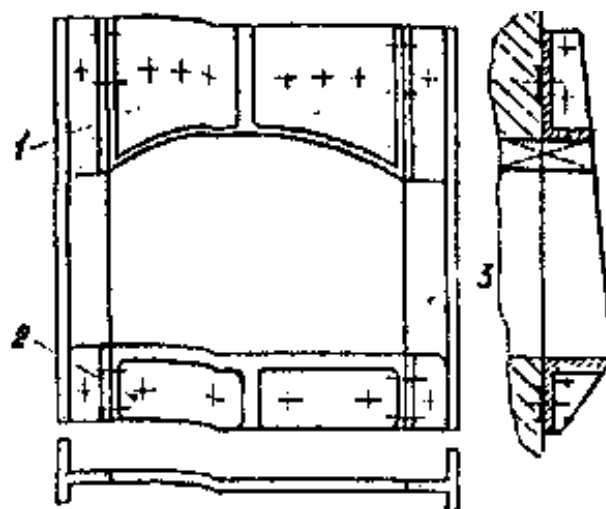
Малюнок 6.4.5-Арочне склепіння печі



Малюнок 6.4.7-Жорсткий каркас печі

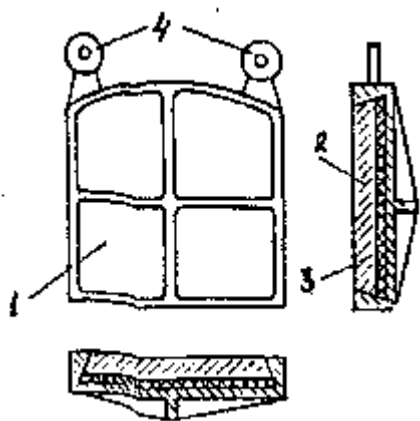


Малюнок 6.4.6-Кладка камерної печі

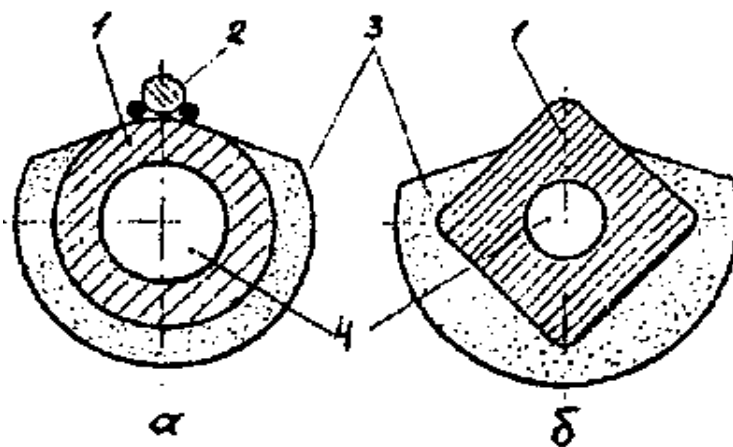


Малюнок 6.4.8-Лита рамка робочих вікон





Малюнок 6.4.9-Лита затулка



Малюнок 6.4.10-Глісажні труби в перерізі

### 6.5 Запитання та завдання для самоконтролю

28. Які матеріали відносять до вогнетривких?
29. Основні вимоги до вогнетривів.
30. Області використання вогнетривів.
31. Класифікація вогнетривів за фізичним складом.
32. Назвіть основні форми вогнетривів.
33. Які способи виготовлення вогнетривів використовують у промисловості?
34. Що називають вогнетривкістю?
35. Як визначається термостійкість вогнетривів?
36. Механічна стійкість вогнетривів.
37. Як визначають термостійкість вогнетривів?
38. Механічна міцність вогнетривів.
39. Якою буває пористість вогнетривів?
40. Як впливає пористість на строк служби вогнетривів?
41. Як визначають пористість вогнетривів?
42. Шлакостійкість та її визначення
43. Теплопровідність вогнетривів.
44. Питома теплоємність вогнетривів.
45. Схема виробів шамотних виробів.
46. Як виготовляються динасові вироби?
47. Схема виробу магнезитових виробів.
48. Природні теплоізоляційні матеріали.
49. Штучні теплоізоляційні матеріали.
50. Будівельні матеріали та метали і вимоги до них.
51. Як виконують фундамент печей?
52. Як виконують футерівку печей?
53. Особливості арочного та підвісного склепіння.
54. Для чого використовують металеві каркаси печей?
55. Основні схеми затулок робочих вікон печей.

## 7 Конструкції та особливості роботи нагрівальних печей. Технологія нагрівання металів. Теплові розрахунки

### 7.1 Реферат

Вимоги до печей та їх класифікація. Теплопередача в робочому просторі печей. Теплообмін випромінюванням. Теплообмін конвекцією. Конструкція та принцип дії камерних печей із сталою температурою в робочій зоні. Камерні печі із змінною температурою в робочій зоні. Методичні печі, конструкція та принцип дії. Сушильні печі для сушки піску. Сушильні печі для сушки форм та стержнів. Основні показники нагрівання металу. Температурні напруження та боротьба з ними. Окислення та знеуглецювання при нагріванні. Тривалість нагрівання. Режим нагрівання. Розрахунок нагрівання металу. Процес сушіння. Пристрої для форсунок. Вибір паливників. Конструкції та принцип дії рекуператорів. Розрахунок рекуператорів. Конструкції рекуператорів.

### 7.2 Терміни, позначення

Термін	Літерне позначення	Одиниця виміру
Тривалість нагрівання	$\tau$	с
Рівномірність нагрівання	$\Delta t$	°С
Масовий угар	$m$	%
Швидкість окислення	$\omega$	г/(см <sup>2</sup> ·год)
Ефективна площа теплопоглинання матеріалу	$F$	м <sup>2</sup>
Ступінь розвитку кладки	$\omega$	—
Ширина робочого простору печі	$B$	м
Довжина робочого простору печі	$L$	м
Висота бокової стінки печі	$H$	м
Стріла склепіння	$h_c$	м
Центральний кут печі	$\alpha$	град
Допустимий перепад температур в матеріалі	$\Delta t$	°С
Модуль пружності	$E$	МПа
Коефіцієнт лінійного розширення	$\beta$	1/К
Межа міцності сталі	$\sigma_d$	МПа
Розрахункова товщина деталі	$S$	м
Коефіцієнт форми тіла	$K_1$	—

### 7.3 Поняття, визначення

Тривалість нагрівання – час, необхідний для нагрівання заготовки за заданим режимом.  
Рівномірність нагрівання – це різниця температур між поверхнею та центром заготовки при вивантаженні її із печі.

Масовий угар – втрати маси металу під час його окислення в печі.

Швидкість нагрівання – зміна температури заготовки в одиницю часу.

Швидкість окислення – відношення маси окалини до площі поверхні заготовки та часу окислення.

Ефективна площа теплопоглинання матеріалу – це площа поверхні, яка поглинає тепло печі.

Ступінь розвитку кладки – відношення площі внутрішньої поверхні кладки печі до ефективної площі теплопоглинання матеріалу, що нагрівається.

Стріла склепіння – це відстань по вертикалі від верхньої точки бокової стінки до верхньої точки склепіння.

Центральний кут печі – це кут, утворений радіусами арочного склепіння, які проведені до верхніх точок бокових стінок.

Розрахункова товщина деталі – залежить від напрямку передачі тепла до заготовки. При односторонньому нагріванні вона дорівнює товщині заготовки, при двохсторонньому – половині товщини заготовки.

Коефіцієнт форми тіла – залежить від форми тіла. Для пластин  $K_1=1$ , для циліндру  $K_1=2$ , для шару  $K_1=3$ .

## 7.4 Основні формули

Тривалість нагрівання тонкого тіла, с:

$$\tau = \frac{S\rho C_p}{K_1\alpha} \ln \frac{t_{ПЕЧ} - t_{П}}{t_{ПЕЧ} - t_K},$$

Температура печі, °С:

$$t_{ПЕЧ} = 100 \sqrt[4]{q_n^K / C_{np} + (T_{нов}^K / 100)^4} - 273,$$

Густина теплового потоку, Вт/м²:

$$q_n^K = C_{П.М.} \left[ \left( \frac{T_{ПЕЧ}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{П}}{100} \right)^4 \right],$$

Коефіцієнт тепловіддачі від простору печі до заготовки, Вт/(м²·К):

$$\alpha = \frac{q_n^K}{T_{ПЕЧ} - T_{П}};$$

Температурний критерій поверхні заготовки:

$$\Phi_{П} = \frac{t_{ПЕЧ} - t_K}{t_{ПЕЧ} - t_{П}};$$

Температурний критерій центру заготовки:

$$\Phi_{Ц} = \frac{t_{ПЕЧ} - t_{Ц}}{t_{ПЕЧ} - t_{П}};$$

Температура центру заготовки, °С:

$$t_{Ц} = t_{ПЕЧ} - \Phi_{Ц} (t_{ПЕЧ} - t_{П});$$

Витрати тепла на нагрівання заготовки, кДж:

$$Q_M = Gc(t_K - t_{П});$$

Втрати тепла із відпрацьованими пічними газами, кДж:

$$Q_2 = BV_{\partial} C_{\partial} t_{\partial};$$

Втрати тепла через відкрите робоче вікно, кДж:

$$Q_B = c_o \left( \frac{T_{печ}}{100} \right)^4 KF;$$

Площа поверхні теплообміну рекуператора, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{сер}};$$

Втрати тепла на нагрівання повітря, кДж:

$$Q = V_n (c_n^k t_n^k - c_n^n t_n^n)$$

Середньологаріфмічний перепад температур р рекуператорі, °С:

прямоточна схема:

$$\Delta t_{сер} = \frac{(t'_d - t'_n) - (t''_d - t''_n)}{\ln \frac{t'_d - t'_n}{t''_d - t''_n}};$$

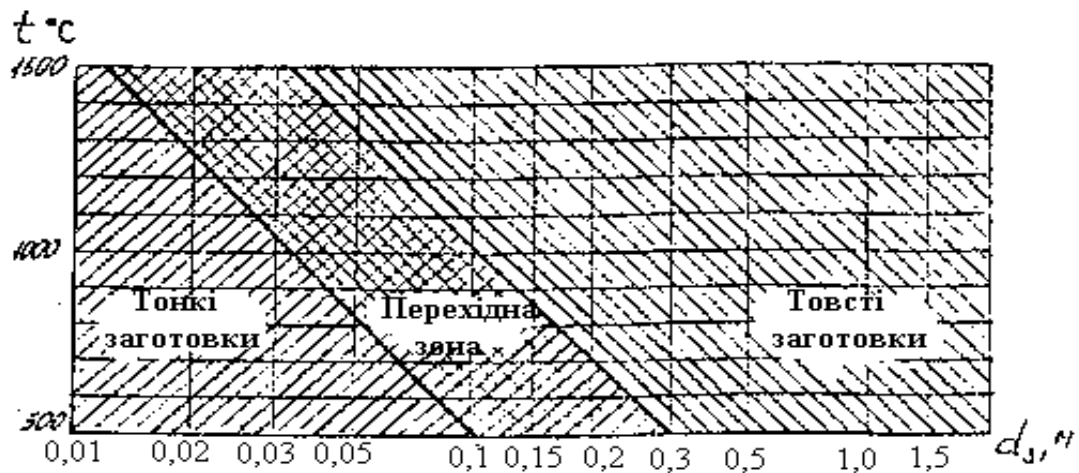
протиточна схема:

$$\Delta t_{сер} = \frac{(t'_d - t''_n) - (t''_d - t'_n)}{\ln \frac{t'_d - t''_n}{t''_d - t'_n}};$$

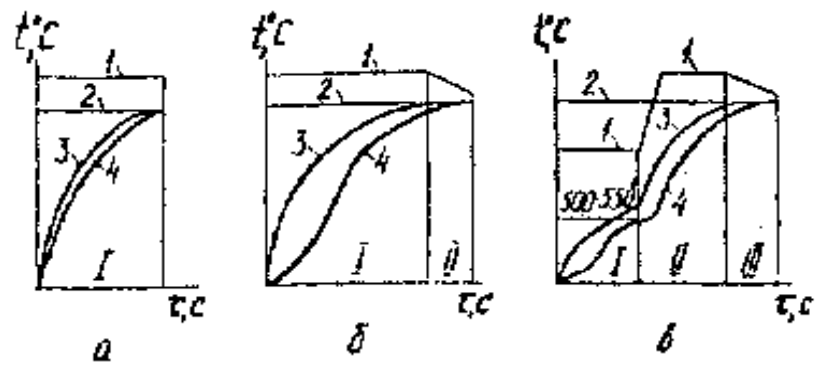
Кількість елементів рекуператору:

$$n = \frac{F}{f};$$

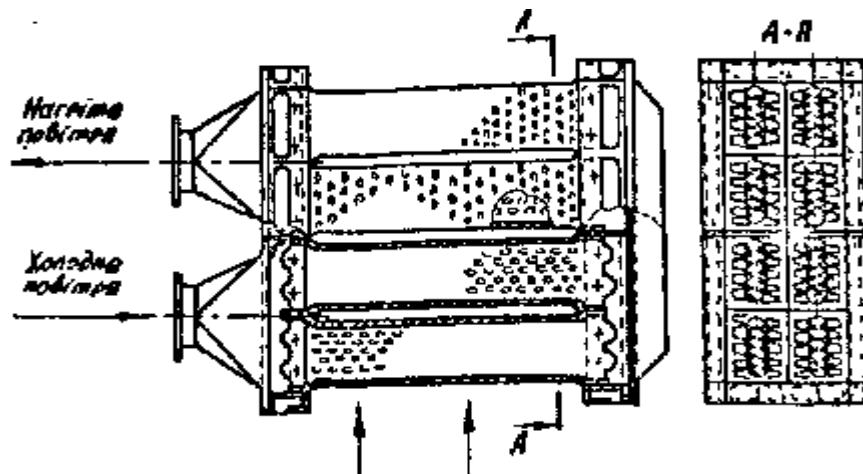
## 7.5 Малюнки, графіки, таблиці



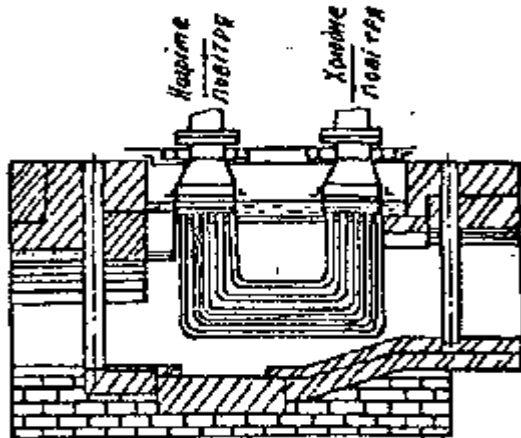
Малюнок 7.5.1-Розподіл заготовок на термічно тонкі та термічно товсті



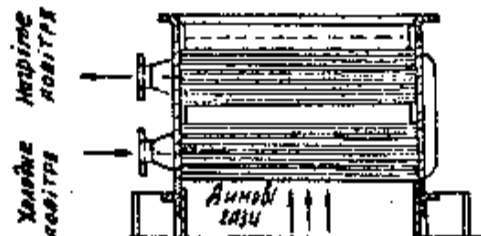
Малюнок 7.5.2-Режими нагрівання сталі



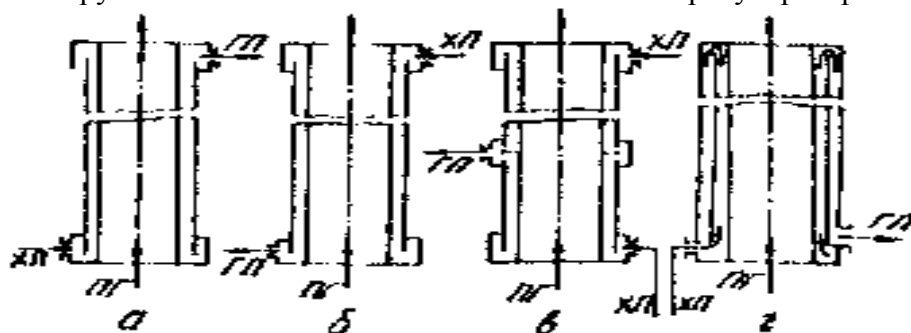
Малюнок 7.5.3-Двоходовий голячий рекуператор



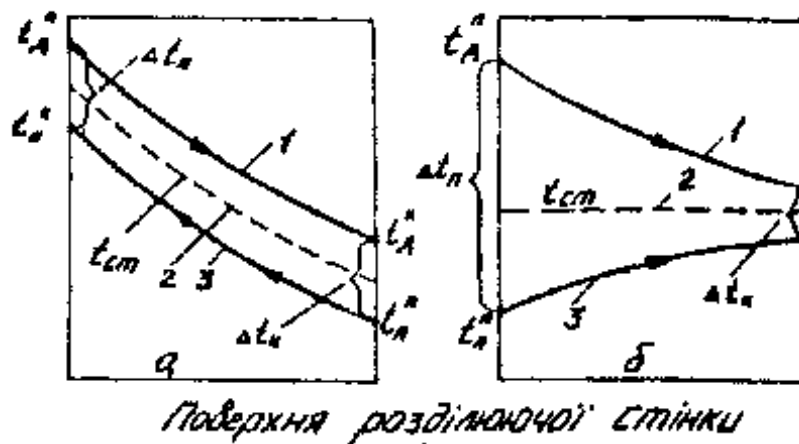
Малюнок 7.5.4-Рекуператор з U-по-дібних труб



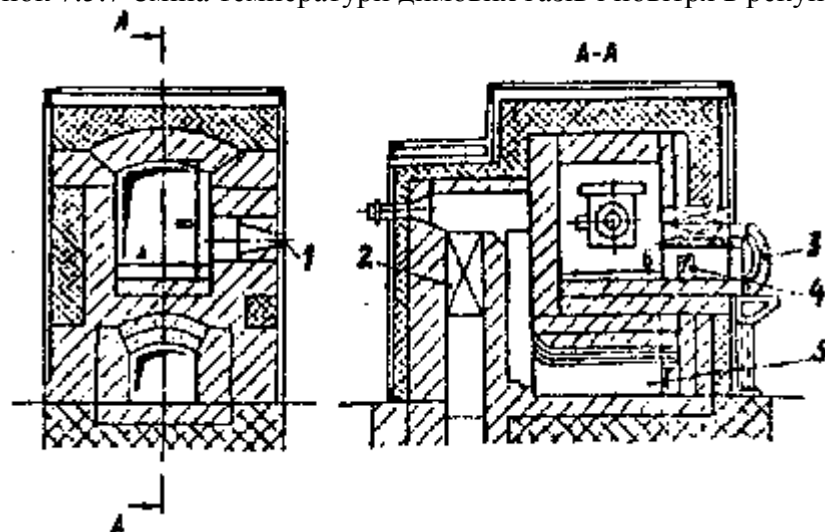
Малюнок 7.5.5-Двоходовий трубчастий рекуператор



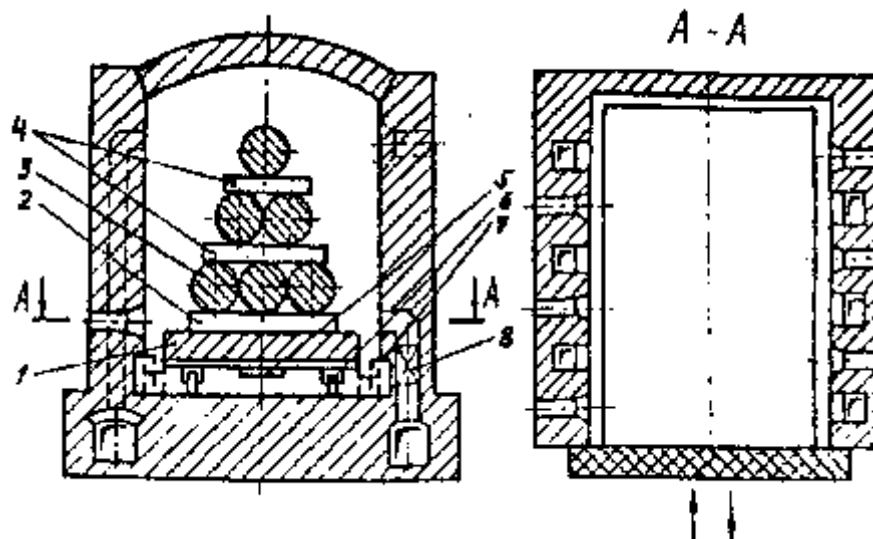
Малюнок 7.5.6-Радіаційні рекуператори



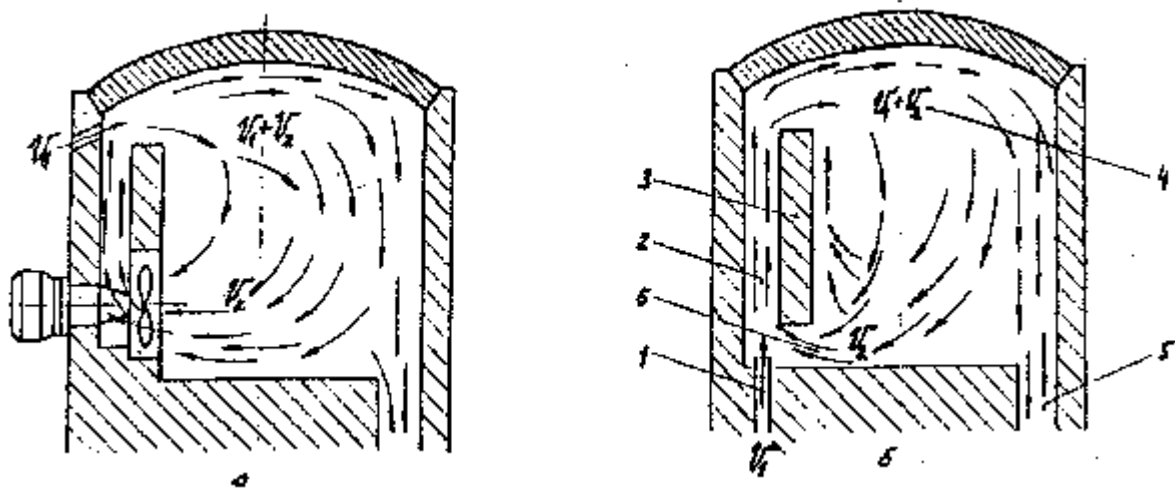
Малюнок 7.5.7-Зміна температури димових газів і повітря в рекуператорі



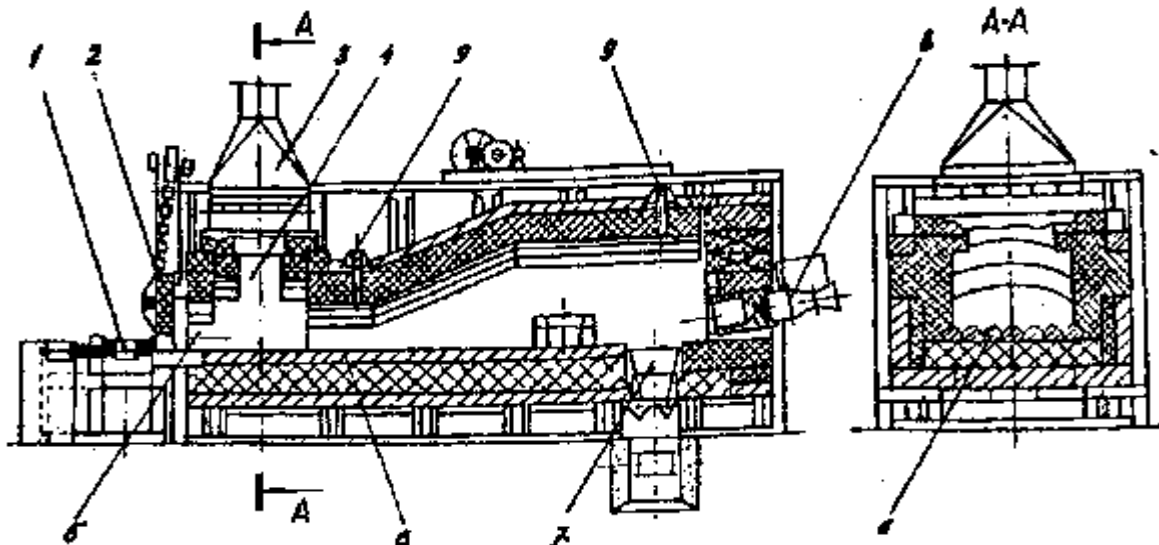
Малюнок 7.5.8-Камерна піч зі сталою температурою в робочому просторі



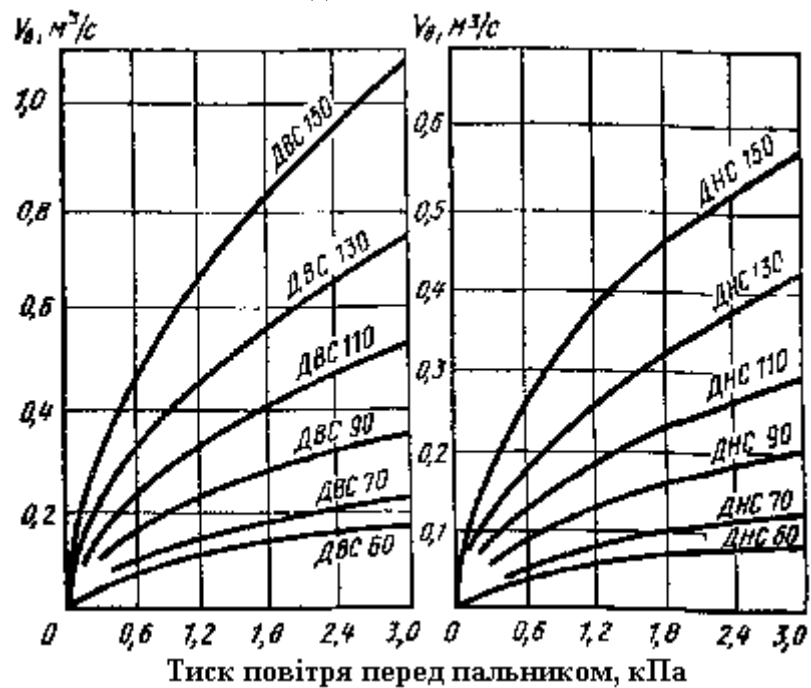
Малюнок 7.5.9-Піч камерна з викочуваним подом



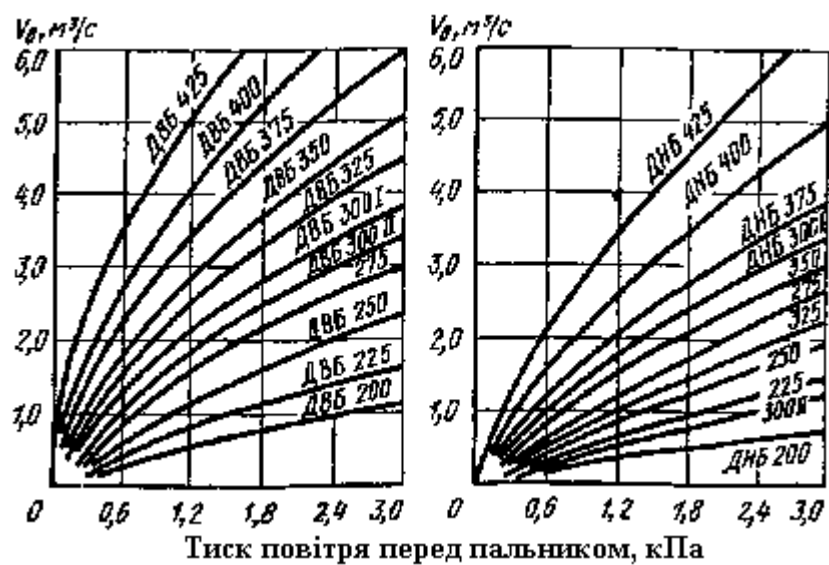
Малюнок 7.5.10-Схеми рециркуляції пічних газів в камерних печах



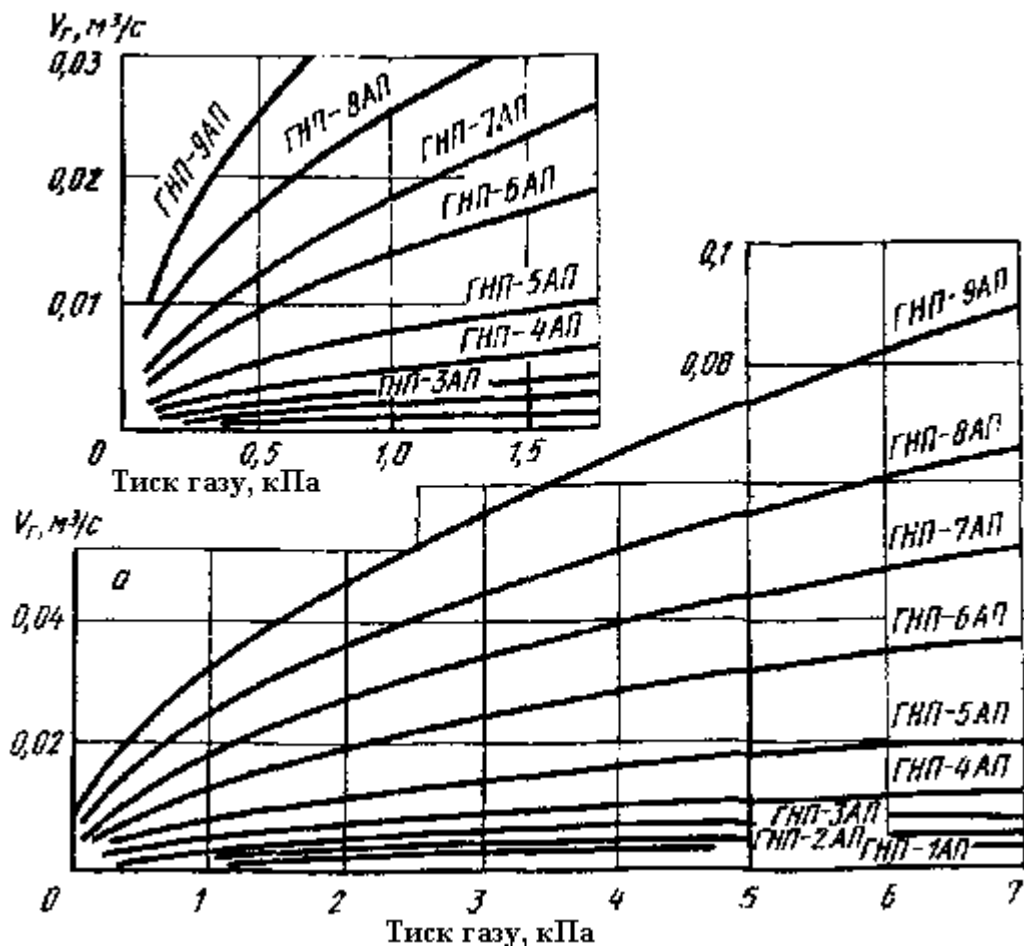
Малюнок 7.5.11-Піч методична штовхальна з жолобчастим подом



Малюнок 7.5.12-Пропускна спроможність пальників середньої потужності

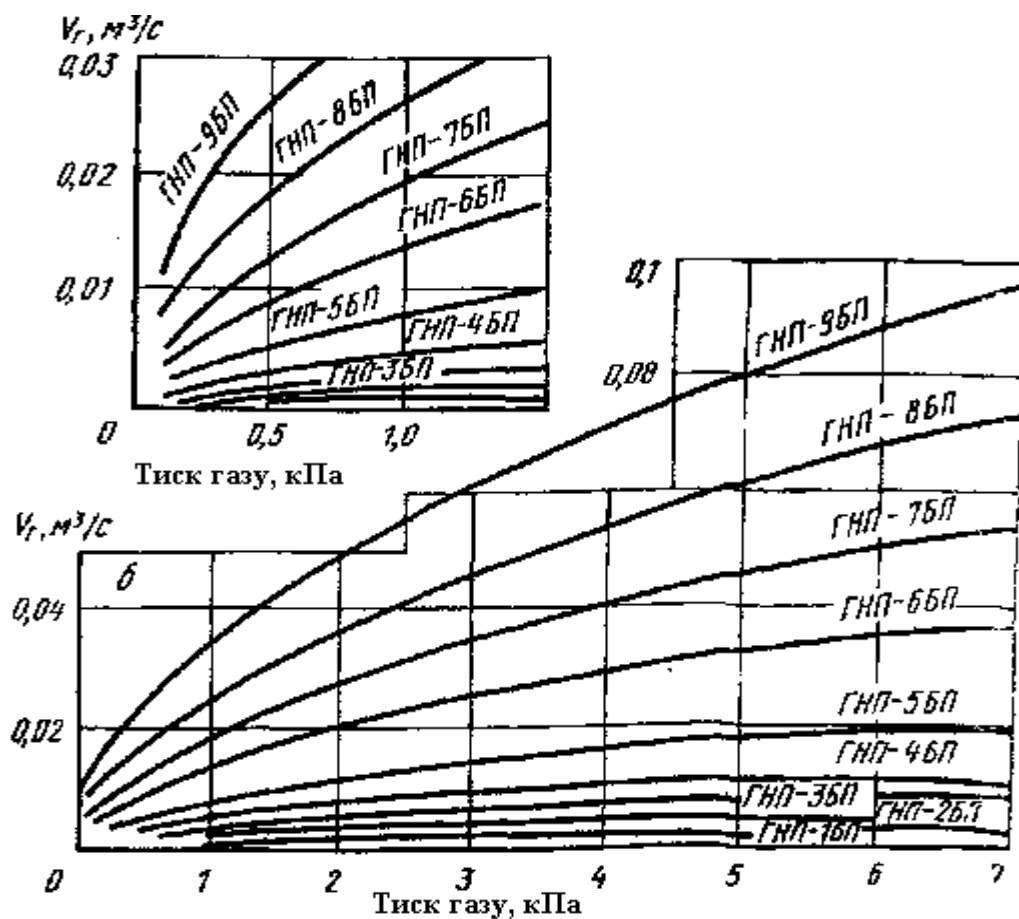


Малюнок 7.5.13-Пропускна спроможність пальників великої потужності

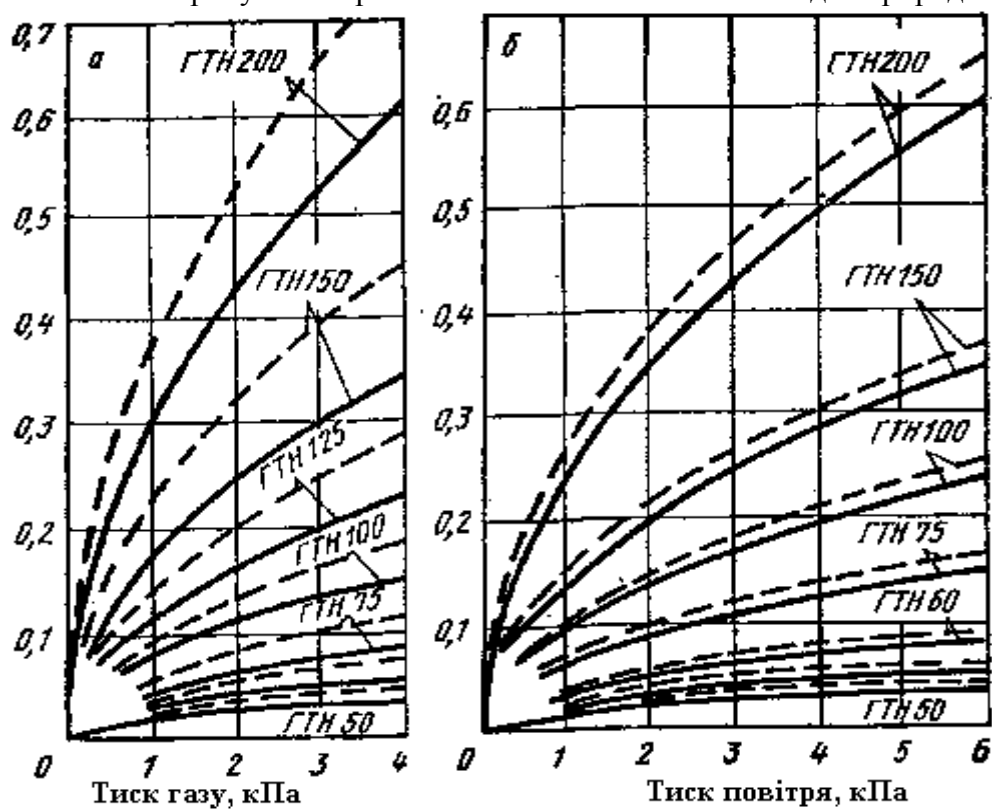


Малюнок 7.5.14.1-Пропускна спроможність пальників типа ГНП для природного газу

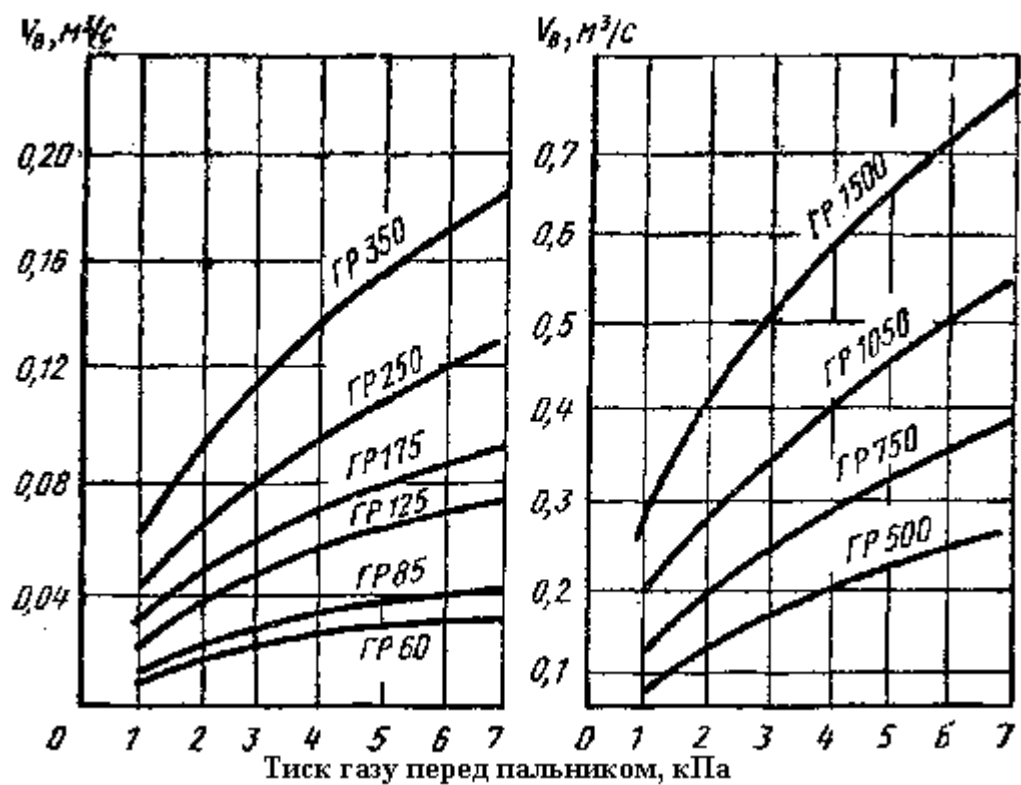




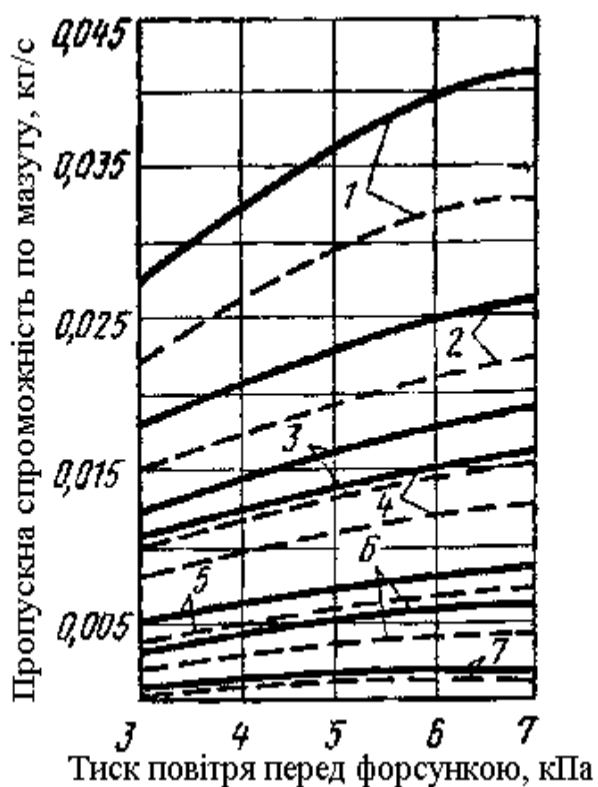
Малюнок 7.5.14.2-Пропускна спроможність пальників типа ГНП для природного газу



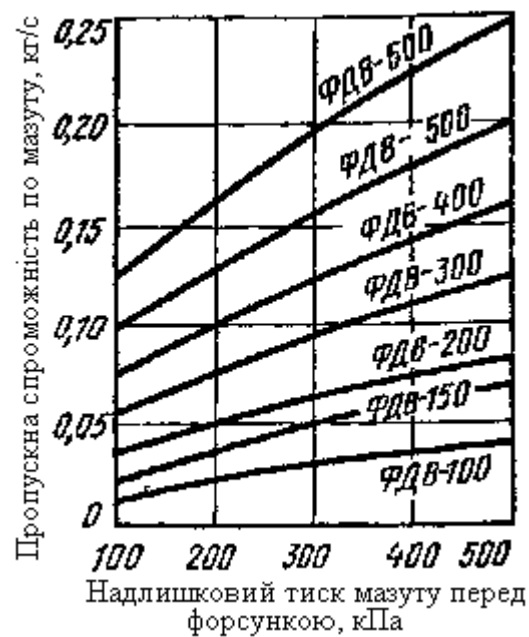
Малюнок 7.5.15-Пропускна спроможність пальників ГТН по газу і повітря



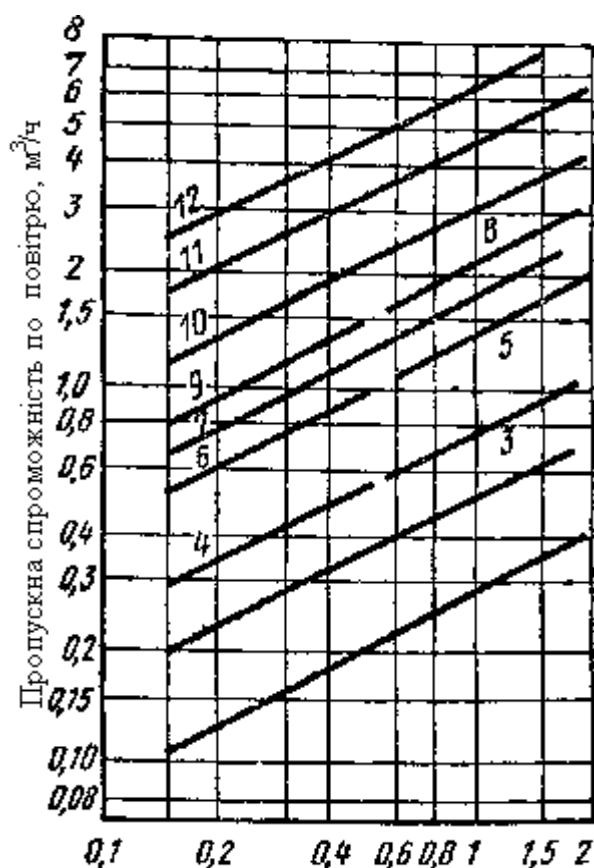
Малюнок 7.5.16-Пропускна спроможність пальників ГР



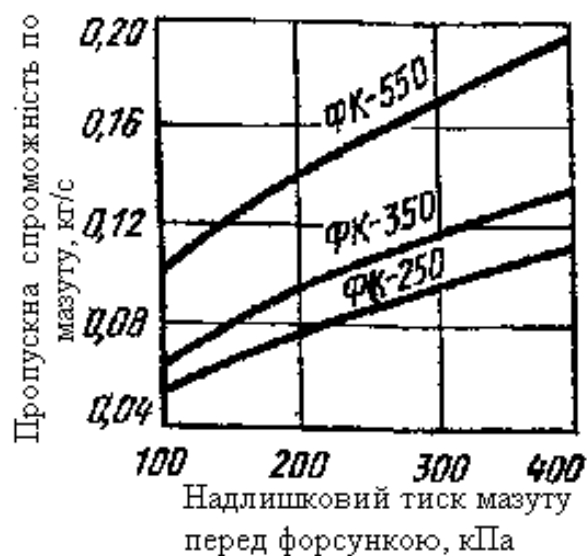
Малюнок 7.5.17-Пропускна спроможність по мазуту форсунок низького тиску



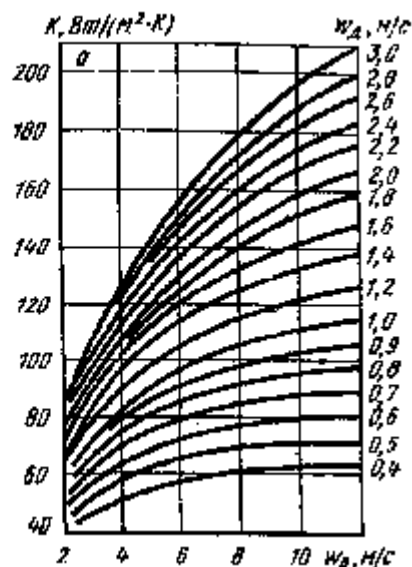
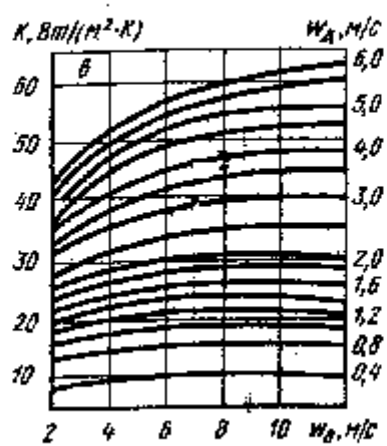
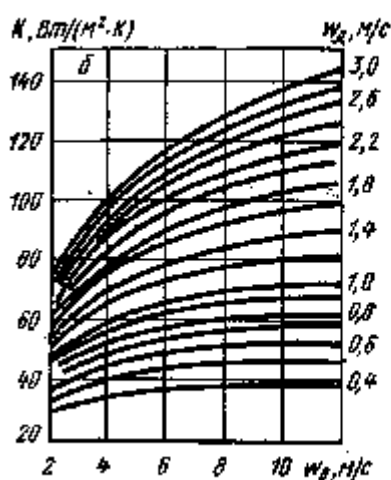
Малюнок 7.5.18- Пропускна спроможність по мазуту форсунок високого тиску



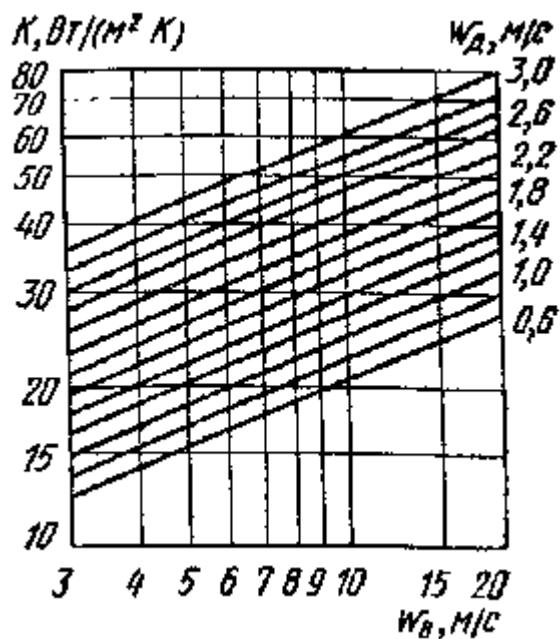
Малюнок 7.5.19-Пропускна спроможність по повітрю форсуночних коробок



Малюнок 7.5.20- Пропускна спроможність по мазуту короткофакельних форсунок



Малюнок 7.5.21-Залежність сумарного коефіцієнту теплопередачі в гольчастому рекуператорі від швидкості диму та повітря



Малюнок 7.5.22-Залежність сумарного коефіцієнту теплопередачі в термоблоці від швидкості руху диму та повітря

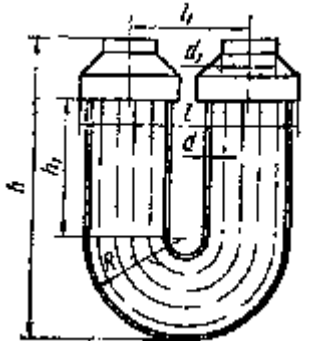
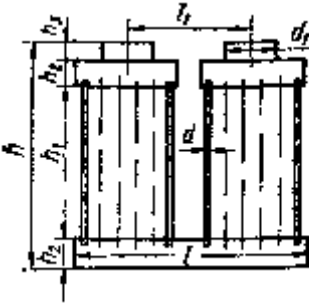
Таблиця 7.5.23-Рекомендовані швидкості газу, диму та повітря в рекуператорах

Тип рекуператору	$\omega_{\Gamma}$	$\omega_{\text{В}}$	$\omega_{\text{Д}}$
Металеві трубчаті:			
при використанні полум'яних пальників	3-5	5-10	1,5-5
при використанні інжекційних пальників	5-20	5-10	1,5-5
Термоблочні	3-10	3-10	0,5-3,0
Радіаційні	-	20-30	3-5
Керамічні:			
при видаленні диму через трубу	-	1-2	0,5-2
при видаленні диму димососом	-	1-2	2-5

Таблиця 7.5.24-Основні характеристики гольчастих труб

Довжи- на тру- би, мм	Переріз, м <sup>2</sup> для проходу				Поверхня нагрівання, м <sup>2</sup> , яка омивається				
	воздуха	диму			возду- хом	димом			умовна
		тип труби				тип труби			
		1	2	3		1	2	3	
880	0,008	0,06	0,07	0,042	0,83	1,34	0,95	0,40	0,25
1135	0,008	0,08	0,092	0,055	1,12	1,81	1,26	0,53	0,33
1385	0,008	0,10	0,114	0,067	1,41	2,27	1,60	0,66	0,425
1640	0,008	0,12	0,136	0,080	1,70	2,64	1,90	0,79	0,50

Таблиця 7.5.25-Основні характеристики секцій металевих трубчатих рекуператорів

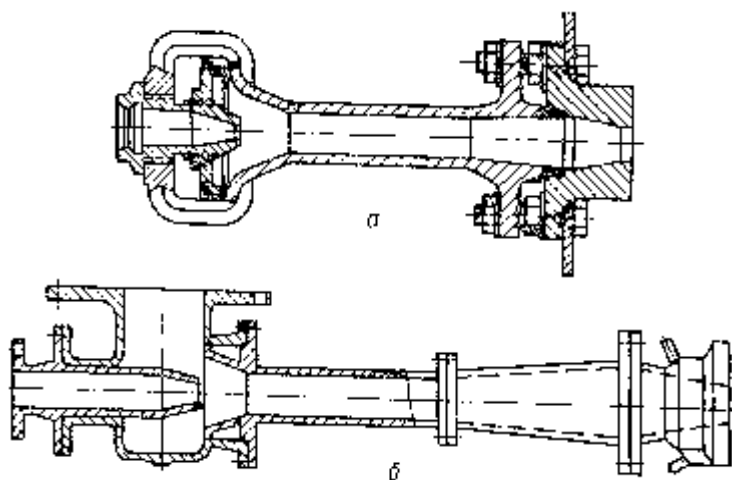
Схема	Но- мер сек- ції	Площа поверх- ні на- гріван- ня, м <sup>2</sup>	Площа проходно- го пере- різу, м <sup>2</sup>	$z_1/S_1$	$z_2/S_2$	$d_{нар}^{**} / d_{нар}'$	Розміри, мм							
							$d_1$	$h$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$l$	$l_1$	$R$
	1	100	0,21/1,5	7/95	7/125	76×4,5	630×8	5400	3440	760	1200	1690	865	-
	2	150	0,30/1,8	8/95	9/125	76×4,5	630×8	5400	3440	760	1200	1880	960	-
	3	200	0,41/2,1	9/95	11/125	76×4,5	720×8	5400	3440	760	1200	2070	1055	-
	4	250	0,53/2,5	10/95	13/125	76×4,5	720×8	5400	3440	760	1200	2260	1150	-
	5	300	0,66/2,8	11/95	15/125	76×4,5	820×8	5400	3440	760	1200	2450	1245	-
	1	100	0,20/3,7	6/140	7/150	$\frac{76 \times 4,5}{102 \times 6}$	630×8	6000	3000	-	-	2480	1340	1090
	2	150	0,28/4,6	7/140	9/150	$\frac{76 \times 4,5}{102 \times 6}$	630×8	6000	2800	-	-	2760	1480	1230
	3	200	0,38/6,3	8/150	11/165	$\frac{76 \times 4,5}{114 \times 6}$	720×8	6000	2600	-	-	3200	1700	1450
	4	250	0,49/6,6	9/150	12/165	$\frac{76 \times 4,5}{114 \times 6}$	720×8	6000	2400	-	-	3500	1850	1600
	5	300	0,62/7,6	10/160	13/175	$\frac{76 \times 4,5}{127 \times 6}$	820×8	6000	2200	-	-	4000	2100	1850

Таблиця 7.5.26-Характеристики секцій термоблочних рекуператорів

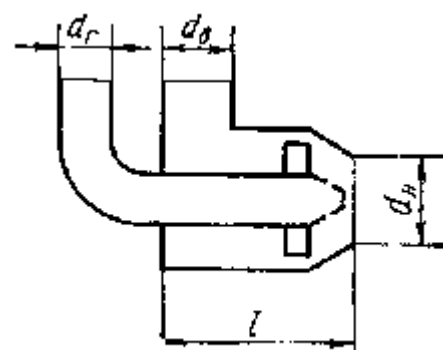
Параметр	Конструкція		
	МЕІ	Теплопроекту	ЦНДІТмашу
Діаметрповітряних труб, мм	19/25	1/2” ( $d_{\text{внут}}=15,75$ мм)	1/2” ( $d_{\text{внут}}=15,75$ мм)
Переріз димових каналів, мм <sup>2</sup>	108×30	95×30	100×30
Поверхня нагрівання із сторони повітря, м <sup>2</sup>	1,2	2,15	0,663
Поверхня нагрівання із сторони диму, м <sup>2</sup>	1,5	2,7	0,656
Кількість повітря, яке проходить через секцію, м <sup>3</sup> /с	0,028	0,067 (при $\omega_{\text{BO}}=9$ м/с)	0,063
Кількість труб у секції	10 -образних	38 прямих	36 прямих
Кількість каналів для диму	8	10	9
Об’єм секції, мм	1000×150×330	1180×136×540	495×322×446

Таблиця 7.5.27-Продуктивність пальників В та Н

Тип і номер пальника	Теплота згоряння газу, кДж/м <sup>3</sup>				Тип і номер пальника	Теплота згоряння газу, кДж/м <sup>3</sup>				
	34900	30300	26880	17050		3760	5020	6270	7250	8780
B15	0,5	0,6	0,7	1,9	H15	14	9,5	7	5	3,7
B18	0,7	0,9	1,1	2,5	H18	19	13	10	8	6
B21	0,9	1,2	1,5	3	H21	27	19	14	11	7
B24	1,2	1,6	1,9	4,5	H24	32	21,5	18	14	11
B28	1,7	2,2	2,6	5,8	H28	45	33	24	18	15
B32	2,2	2,8	3,4	7,7	H32	64	41	31	24	18
B37	2,9	3,7	4,5	10,5	H37	81	57	42	31	25
B42	3,8	4,7	6	13,3	H42	105	75	55	40	33
B48	5	6,1	7,7	17,5	H48	136	98	68	52	40
B56	6,6	8,5	10,4	24	H56	185	130	95	70	56
B65	9	12	14	32	H65	245	174	130	95	75
B75	12	15	18	44	H75	335	225	180	125	100
B86	18	20	25	56	H86	445	300	220	175	130
B100	22	28	34	76	H100	580	430	300	225	180
B116	29	38	44	103	H116	750	575	415	320	235
B134	38	49	60	134	H134	1070	750	530	400	310
B154	50	65	78	178	H154	1430	1000	750	530	420
B178	65	85	104	240	H178	1900	1300	950	750	580
B205	90	116	128	320	H205	2500	1715	1270	1000	770
B235	118	146	180	590	H235	3400	2300	1700	1300	1000



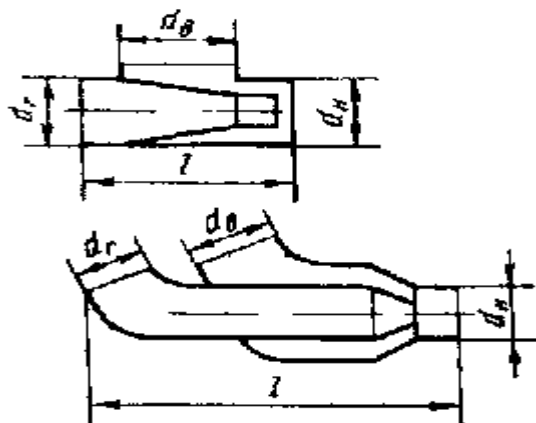
Малюнок 7.5.28-Інжекційні пальники



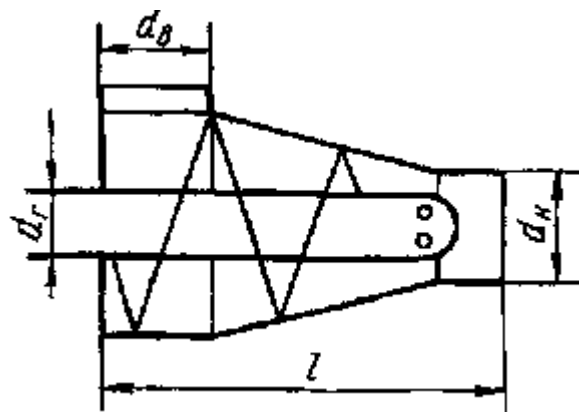
Малюнок 7.5.29-Пальники Теплопроекту

Таблиця 7.5.30-Продуктивність пальників типу П

Тип та номер пальника	Теплота згоряння газу ,кДж/м <sup>3</sup>									
	5850	6690	7520	8360	3760	4180	5430	5850	6270	6690
П65	113	92	73	66	277	230	169	145	134	112
П75	166	128	105	85	362	307	226	197	171	147
П85	212	184	130	108	480	414	288	257	245	215
П100	302	250	187	161	659	562	399	344	328	294
П116	408	326	254	208	896	782	550	486	425	368
П134	555	437	353	280	1200	1010	755	653	583	516
П154	725	564	445	363	1590	1330	960	845	757	664
П178	952	762	630	506	2030	1820	1250	1125	1000	885
П205	1245	1005	805	645	2650	2130	1660	1440	1260	1130
П235	1580	1270	1010	830	3480	2930	2090	1880	1680	1450
П270	2110	1700	1320	1080	4542	3860	2780	2480	2210	1900



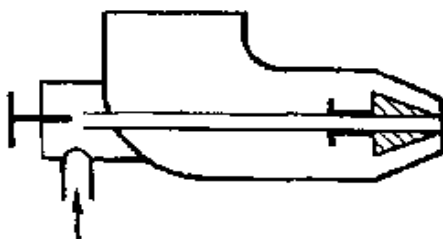
Малюнок 7.5.31-Двухпроводні пальники Стальпроекту



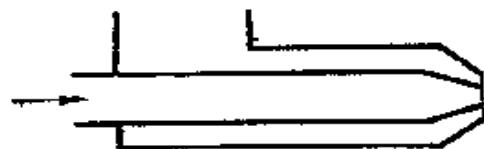
Малюнок 7.5.32-Плоскополум'яні пальники

Таблиця 7.5.33-Продуктивність та основні параметри плоскополум'яних пальників

Позначення пальника	Продуктивність	Основні розміри, мм			
		d <sub>н</sub>	d <sub>г</sub>	d <sub>в</sub>	l
ГПП-1	5	25	26	34	190
ГПП-2	10	35	30	48	230
ГПП-3	20	50	40	68	330
ГПП-4	40	75	60	93	400
ГПП-5	80	105	74	112	490
ГПП-6	125	140	115	146	620
ГПП-7	160	165	135	166	700



Малюнок 7.5.34-Форсунка низького тиску



Малюнок 7.5.35- Форсунка високого тиску

Таблиця 7.5.36-Хімічний склад вуглецевих сталей, %

Мар- ка	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	As	Режим термичес- кой обра- ботки: от- жиг при t, °C
08кп	0,06	0,01	0,38	0,035	0,017	0,022	0,055	0,03	0,08	0,001	0,039	930
08	0,08	0,08	0,31	0,05	0,029	0,045	0,07	0,02	Следы	0,002	0,032	930
20	0,23	0,11	0,635	0,034	0,034	Следы	0,074	-	0,13	0,01	0,036	930
40	0,415	0,11	0,643	0,029	0,031	>>	0,063	-	0,12	0,006	0,033	860
У8	0,8	0,13	0,32	0,009	0,008	0,11	0,13	0,01	0,07	0,004	0,021	800
У8'	0,84	0,13	0,24	0,014	0,014	Следы	Следы	-	0,02	0,004	0,008	-
У12	1,22	0,16	0,35	0,015	0,009	0,11	0,13	0,01	0,077	0,006	0,025	800



Таблица 7.5.37-Коефіцієнт теплопроводності вуглецевих сталей, Вт/(м·°С)

Температу-ра, °С	Марка сталі						
	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
0	65,1	59,5	51,9	51,9	49,8	51,1	45,2
50	62,8	58,6	51,5	51,5	49,4	50,2	45,2
100	60,2	57,7	51,1	50,6	48,1	48,9	44,8
150	57,7	55,2	49,9	49,8	46,9	47,7	42,2
200	55,6	53,5	48,5	48,1	45,1	46,1	42,7
250	53	51,5	46,5	46,9	43	43,9	41,1
300	50,9	49,4	44,4	45,6	41,4	41,9	40,2
350	48,5	47,7	43,6	44,3	40,2	40,2	38,5
400	46,5	44,8	42,7	41,9	38,1	37,6	37,2
450	43,5	42,3	41,1	40	36,4	36,9	36,1
500	41,1	40,2	39,3	38,1	35,2	35,6	34,7
550	39,4	38,1	37,7	36,1	33,9	34,4	33,5
600	37,4	36,1	35,6	33,6	32,7	33,3	31,9
650	36,1	33,9	33,9	31,9	31,4	31,9	30
700	33,9	31,9	31,9	30	30,1	30,7	28,3
750	31,9	29,8	28,5	26,9	26,9	27,3	26,9
800	30,1	28,5	25,9	24,8	24,3	24,3	23,7
850	27,7	27,2	25,9	24,8	24,3	24,3	23,7
900	27,2	26,7	26,4	25,7	25,7	25,2	24,8
950	27,2	27,2	27,2	26,1	26,5	26,1	25,7
1000	27,7	27,7	27,7	26,9	26,9	26,9	26,1
1050	28	28	28	27,2	27,7	27,7	26,9
1100	28,5	28,5	28,5	28	28,6	28,6	27,2
1150	29,3	29,3	29,3	28,7	29,4	28,7	28
1200	29,8	29,8	29,8	29,5	30,2	29,5	28,6

Таблица 7.5.38-Теплоємність вуглецевих сталей, кДж/кг

Темпера- тура, °С	Вуглецеві сталі						
	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
1	2	3	4	5	6	7	8
100	48,57	48,57	48,56	48,57	48,57	50,24	48,57
150	74,11	74,11	74,11	74,11	75,36	76,62	75,36
200	100,48	100,48	100,48	99,65	102,99	104,67	102,99
250	127,69	127,69	127,69	126,65	130,84	130,84	130,84
300	175,55	155,75	155,75	154,49	159,52	155,758	159,52
350	184,64	184,64	184,64	183,17	189,03	190,49	189,03
400	214,36	216,04	216,04	212,69	219,39	221,06	217,72
450	146,81	246,81	246,81	244,93	250,58	254,35	250,58
500	280,52	280,52	280,52	278,42	284,70	286,79	282,61
550	315,48	317,78	315,48	213,17	320,08	322,38	317,78
600	354,20	354,20	354,20	349,18	356,72	361,74	351,69
650	397,33	394,61	394,61	386,44	391,88	400,05	389,16
700	439,61	439,61	439,61	424,96	433,75	442,54	430,82
750	483,58	496,14	502,42	508,59	543,24	558,94	540,09
800	542,61	545,96	562,71	539,26	572,75	589,50	572,75
850	580,08	590,76	597,88	562,29	604,99	619,23	604,99
900	625,51	633,04	633,04	591,59	636,81	651,88	636,81
950	656,28	664,24	664,24	620,48	668,28	680,15	668,21
1000	690,82	729,76	695,00	653,14	699,19	711,76	699,19
1050	725,36	698,00	725,36	685,70	729,76	742,95	729,76

Продовження таблиці 7.5.38

1	2	3	4	5	6	7	8
1100	709,90	764,51	759,90	713,85	764,51	773,72	764,51
1150	789,63	794,45	794,45	746,29	794,45	808,89	794,45
1200	823,96	828,99	823,96	778,74	828,99	839,03	828,99
1250	858,29	863,53	858,29	816,43	863,63	873,99	863,83
1300	908,95	892,63	892,63	849,08	898,07	908,95	892,63

Таблиця 7.5.39-Густина вуглецевих сталей, г/см<sup>3</sup>

Темпера- тура, °C	Вуглецеві сталі					
	08кп	08	20	30	У8	У12
0	7,876	7,861	7,863	7,858	7,855	7,834
15	7,871	7,856	7,859	7,854	7,851	7,830
50	7,861	7,847	7,849	7,845	7,842	7,822
100	7,846	7,832	7,834	7,832	7,829	7,809
150	7,830	7,846	7,819	7,817	7,815	7,796
200	7,814	7,800	7,803	7,801	7,800	7,781
250	7,798	7,783	7,787	7,784	7,784	7,765
300	7,781	7,765	7,770	7,766	7,767	7,749
350	7,763	7,748	7,753	7,748	7,749	7,731
400	7,745	7,730	7,736	7,730	7,731	7,713
450	7,727	7,711	7,718	7,711	7,713	7,694
500	7,708	7,692	7,699	7,692	7,694	7,675
550	7,688	7,673	7,679	7,672	7,675	7,655
600	7,668	7,653	7,659	7,652	7,655	7,634
650	7,648	7,632	7,635	7,628	7,632	7,613
700	7,628	7,613	7,617	7,613	7,612	7,592
750	7,610	7,594	7,620	7,624	7,604	7,581
800	7,598	7,582	7,624	7,635	7,594	7,565
850	7,601	7,789	7,616	7,617	7,565	7,528
900	7,602	7,594	7,600	7,590	7,533	7,489
950	7,580	7,572	7,574	7,564	7,509	7,463
1000	7,550	7,543	7,548	7,538	7,485	7,438
1050	7,523	7,515	7,522	7,512	7,460	7,413
1100	7,495	7,488	7,496	7,486	7,436	7,388

Таблиця 7.5.40-Коефіцієнт лінійного розширення вуглецевих сталей, 10<sup>-6</sup> 1/°C

Темпера- тура, °C	Вуглецеві сталі					
	08кп	08	20	40	У8	У12
1	2	3	4	5	6	7
50	12,38	11,74	11,92	10,72	10,84	10,30
100	12,62	12,19	12,18	11,21	11,11	10,60
150	12,86	12,63	12,43	11,69	11,39	10,90
200	13,08	12,99	12,66	12,14	11,72	11,25
250	13,27	13,27	12,88	12,60	12,11	11,68
300	13,46	13,51	13,08	13,00	12,49	12,11
350	13,64	13,71	13,27	13,31	12,84	12,51
400	13,83	13,91	13,47	13,58	13,15	12,88
450	14,04	14,11	13,67	13,82	13,41	13,21
500	14,25	14,30	13,92	14,05	13,65	13,53

Продовження таблиці 7.5.40

1	2	3	4	5	6	7
550	14,45	14,49	14,17	14,33	13,90	13,85
600	14,65	14,68	14,41	14,58	14,16	14,16
650	14,88	14,91	14,85	14,98	14,56	14,50
700	15,00	15,05	14,88	14,85	14,74	14,69
750	15,01	15,10	13,75	13,22	14,19	14,38
800	14,72	14,79	12,64	11,84	13,83	14,33
850	13,68	13,57	12,33	12,04	14,45	15,32
900	12,89	12,60	12,41	12,65	15,19	16,33
950	13,20	12,88	12,91	13,14	15,47	16,60
1000	13,79	13,49	13,37	13,59	15,72	16,84
1050	14,24	13,96	13,78	13,99	15,95	17,06
1100	14,65	14,38	14,16	14,36	16,15	17,26
1150	15,02	14,77	14,50	14,69	16,34	17,44
1200	15,37	15,12	14,81	15,00	16,52	17,60

Таблиця 7.5.41-Хімічний склад низьковуглецевих сталей

№ п/п	Марка сталі	Зміст елементів, в %						
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
1	15X	0,12-0,18	0,4-0,7	0,17-0,37	0,7-1	0,25	-	-
2	15XA	0,12-0,17	0,4-0,7	0,17-0,37	0,7-1	0,25	-	-
3	20X	0,17-0,23	0,5-0,8	0,17-0,37	0,7-1	0,25	-	-
4	15XM	0,11-0,18	0,4-0,7	0,17-0,37	0,8-1,1	0,25	0,4-0,55	-
5	15XΦ	0,15	0,57	0,56	1,08	-	-	-
6	15M	0,1-0,18	0,4-0,7	0,17-0,37	0,3	0,3	0,4-0,55	-
7	12XH2	0,13	0,33	0,19	0,39	2,18	-	-
8	12MX	0,15	0,54	0,28	0,52	-	0,5	-
9	12XMΦ	0,12	0,4-0,6	0,2-0,4	0,9-1,2	-	0,25-0,35	0,15-0,3
10	30X	0,315	0,69	0,2	1,09	0,073	-	-
11	30Г2	0,23	1,51	0,12	0,06	0,04	0,025	-
12	30XГC	0,36	0,9	1,05	1,04	-	-	-
13	35Г2	0,3-0,4	1,4-1,8	0,13	0,05	0,06	-	-
14	30XM	0,26-0,34	0,4-0,7	0,17-0,37	0,8-1,1	0,25	0,15-0,25	-
15	35XM	0,3-0,4	0,4-0,7	0,15-0,3	0,8-1,1	0,06	0,15-0,25	-
16	30XH3A	0,27-0,33	0,3-0,6	0,17-0,37	0,6-0,9	2,75-3,15	-	-
17	40XC	0,37-0,45	0,3-0,6	1,2-1,6	1,3-1,6	0,07	0,08	-
18	40X3M	0,4	0,6	0,3	3,0	0,08	0,5	-
19	40Г	0,35-0,55	0,7-1	0,17-0,37	0,3	0,3	0,08	-
20	50Г2	0,45-0,55	1,4-1,8	0,17-0,37	0,05	0,06	0,07	-
21	50C2Г	0,485	0,9	1,98	0,04	0,156	-	-

Таблиця 7.5.42-Коефіцієнт теплопровідності низьковуглецевих сталей

№ п/п	Марка сталі	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C), при температурі °C										
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1	15X	39,0	37,0	36,1	34,9	33,8	33,0	32,5	31,5	30,8	29,8	29,4
2	15XA	39,2	37,3	36,3	35,1	34,1	33,2	32,6	31,6	30,9	30,0	29,5
3	20X	39,3	37,4	36,3	35,0	34,0	33,1	32,4	31,4	30,7	30,2	29,7
4	15XM	44,3	44,2	41,3	40,7	38,9	36,1	33,7	32,4	29,1	28,5	28,8
5	15X	45,2	45,0	44,3	43,5	40,7	37,7	33,7	29,8	29,7	9,5	29,8
6	15M	45,6	45,3	43,6	42,4	40,7	37,2	36,1	32,6	31,4	30,2	30,6
7	12XM3	37,8	37,5	36,3	35,1	34,1	33,2	32,6	31,6	30,9	30,1	29,6
8	12MX	45,0	44,5	43,1	40,9	38,7	36,9	34,7	33,6	32,5	31,8	32,3
9	12XMФ	44,8	44,2	41,3	40,7	38,9	36,2	33,7	31,5	29,1	28,5	28,8
10	30X	47,7	46,5	44,4	42,3	38,5	35,8	31,9	38,8	26,1	26,7	28,0
11	30Г2	46,3	34,9	44,8	43,7	40,2	37,2	34,4	31,4	29,8	25,6	27,2
12	30ХГС	37,6	37,2	40,7	38,4	37,2	36,1	34,9	33,7	32,6	32,8	33,0
13	35Г2	39,1	38,6	38,2	37,8	37,4	37,1	36,6	35,9	35,6	35,2	35,4
14	30XM	43,6	38,6	38,1	37,9	37,8	37,4	37,0	36,2	35,0	35,3	35,5
15	35XM	44,9	41,8	41,0	40,3	39,3	35,4	32,2	32,0	30,0	26,0	27,1
16	30XM3A	42,1	41,6	40,0	36,9	35,0	34,1	37,2	32,3	32,5	32,7	33,0
17	40XC	47,4	44,1	39,9	36,0	34,4	34,2	34,1	33,9	33,7	34,0	34,2
18	40X3M	37,0	37,2	37,7	36,8	34,7	33,0	30,9	29,3	29,1	29,3	29,5
19	40Г	65,2	57,3	51,4	48,2	48,2	45,8	44,7	44,2	44,5	44,7	45,1
20	50Г2	42,5	39,2	37,0	36,2	35,4	34,5	44,7	33,5	33,4	33,8	34,1
21	50C2Г	26,7	28,5	30,2	31,1	31,1	31,1	30,2	28,0	25,1	25,6	26,4

Таблиця 7.5.43-Теплоємність низьковуглецевих сталей

№ п/п	Марка сталі	Теплоємність, кДж/кг, при температурі °C											
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
1	15X	46,4	95,2	147,8	204,8	265,1	338,8	418,7	531,2	629,3	704,2	780,8	850,4
2	15XA	46,5	95,4	148,2	205,1	265,3	339,0	418,9	531,4	629,1	704,1	780,6	850,3
3	20X	46,6	95,5	148,4	205,3	265,6	339,3	419,0	531,7	629,8	702,0	780,5	845,4
4	15XM	46,2	95,1	147,4	204,6	265,0	339,1	419,1	531,9	629,4	704,5	780,7	850,6
5	15XФ	46,1	95,0	147,1	204,2	264,8	338,9	418,8	531,3	629,5	704,6	781,2	851,2
6	15M	46,3	95,3	147,2	204,4	264,9	339,0	419,2	532,0	629,6	704,7	782,3	852,1
7	12XH2	46,4	95,4	147,7	204,7	265,1	339,4	419,4	533,2	628,9	703,1	781,4	849,2
8	12MX	46,3	95,3	147,4	204,5	265,0	339,3	419,5	534,1	628,3	703,2	780,1	848,6
9	12XMФ	46,5	95,4	147,5	204,6	265,2	339,5	419,6	534,4	628,0	703,4	780,2	848,8
10	30X	46,8	95,6	148,3	205,5	265,7	339,7	419,9	535,2	630,3	698,8	780,3	850,0
11	30Г2	46,9	95,7	149,1	206,4	266,3	340,2	420,1	536,3	630,5	699,0	773,4	846,2
12	30ХГС	46,7	95,5	148,7	206,2	266,1	340,3	420,2	536,8	630,7	698,5	772,5	847,3
13	35Г2	47,1	95,8	149,3	206,6	266,7	340,4	420,3	536,9	631,2	699,2	770,1	842,1
14	30XM	46,6	95,3	148,1	205,9	266,2	340,1	420,0	537,3	630,2	698,1	770,4	848,2
15	35XM	46,8	95,4	147,9	205,2	265,9	339,8	419,9	537,2	631,3	698,9	771,0	841,0
16	30XH3A	46,9	95,5	148,4	205,8	266,4	340,5	420,4	538,0	632,8	699,3	772,6	847,9
17	40XC	47,1	95,52	148,9	206,3	267,0	341,1	420,5	538,4	68,3	698,4	769,2	840,2
18	40X3M	47,0	95,48	148,5	206,0	266,7	340,8	420,2	538,2	628,5	699,2	768,1	839,3
19	40Г	46,9	95,42	148,0	205,7	266,4	340,5	419,8	537,9	629,0	700,3	767,5	835,6
20	50Г2	47,2	95,8	149,2	205,9	267,1	341,2	420,1	540,2	624,1	701,4	760,3	832,1
21	50C2Г	47,3	95,86	149,3	206,6	267,5	341,4	420,5	542,3	620,0	702,0	762,0	830,4

Таблиця 7.5.44-Коефіцієнт лінійного розширення низьковуглецевих сталей

№ п/п	Марка сталі	Коефіцієнт лінійного розширення, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ , при температурі $^\circ\text{C}$								
		50	100	200	300	400	500	600	700	800
1	15X	11,6	11,7	12,2	12,9	13,4	13,7	13,9	14,2	11,9
2	15XA	11,5	11,6	12,3	12,8	13,5	13,8	14,0	14,3	12,0
3	20X	11,5	11,8	12,5	13,0	13,6	14,0	14,3	14,4	12,0
4	15XФ	11,8	11,9	12,4	13,1	13,7	14,2	14,5	14,6	12,2
5	15XM	11,7	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	14,5	12,1
6	15M	11,8	12,0	12,6	13,2	13,7	14,2	14,7	14,8	12,3
7	12XH2	12,0	12,2	12,9	13,2	13,6	14,2	14,3	14,5	12,6
8	12MX	12,3	12,7	13,2	13,6	14,2	14,5	14,9	15,1	12,5
9	12XMФ	13,1	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	12,3
10	30X	11,8	12,2	12,8	13,3	13,7	13,1	14,5	14,8	12,1
11	30Г2	11,5	11,9	12,7	13,4	13,9	14,3	14,7	15,1	12,1
12	30ХГС	11,9	12,1	12,6	13,2	13,5	13,9	14,2	14,5	11,9
13	35Г2	12,0	12,2	12,4	13,2	13,9	14,2	14,4	14,4	12,2
14	30XM	12,0	12,3	12,6	13,0	14,5	14,5	14,6	14,7	12,4
15	35XM	12,1	12,3	12,5	13,5	14,2	14,4	14,7	14,5	12,1
16	30XH3A	10,9	11,4	12,3	12,8	13,2	13,4	13,7	13,3	10,7
17	40XC	10,9	11,5	12,1	12,6	13,1	13,6	13,9	14,1	10,9
18	40X3M	10,7	11,3	12,0	12,5	13,0	13,5	13,7	14,2	10,8
19	40Г	11,1	11,7	12,2	12,7	13,3	13,8	14,1	14,3	11,0
20	50Г2	10,8	11,4	12,3	13,0	13,6	13,9	14,2	14,3	12,8
21	50C2Г	10,6	11,2	12,2	12,9	13,4	13,5	14,1	14,4	13,6

Таблиця 7.5.45-Густина низьковуглецевих сталей

№ п/п	Марка сталі	Густина, кг/м <sup>3</sup> , при температурі °C												
		0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
1	15X	7840	7845	7800	7750	7720	7710	7960	7665	7640	7625	7615	7605	7690
2	15XA	7835	7830	7810	7790	7770	7740	7720	7700	7682	7654	7640	7625	7615
3	20X	7845	7840	7830	7805	7780	7755	7730	7720	7705	7690	7665	7550	7536
4	15XM	7850	7850	7790	7758	7725	7690	7656	7622	7615	7605	7594	7590	7585
5	15XФ	7763	7758	7790	7759	7726	7693	7654	7618	7580	7570	7561	7553	7549
6	15M	7850	7850	7789	7758	7725	7690	7654	7615	7607	7601	7591	7585	7770
7	12XH3	7819	7814	7788	7756	7722	7686	7650	7613	7577	7565	7555	7550	7540
8	12MX	7810	7805	7795	7785	7750	7710	7695	7680	7670	7660	7650	7640	7620
9	12XMФ	7800	7800	7790	7790	7770	7755	7745	7735	7720	7710	7700	7690	7680
10	30X	7847	7842	7818	7787	7753	7718	7681	7643	7603	7619	7579	7525	7510
11	30Г2	7854	7849	7826	7794	7760	7723	7685	7646	7705	7626	7590	7532	7515
12	30ХГС	7842	7830	7815	7803	7775	7750	7730	7704	7686	7670	7652	7630	7621
13	35Г2	7850	7846	7828	7796	7762	7732	7703	7680	7654	7628	7600	7586	7572
14	30XM	7830	7805	7774	7752	7730	7704	7688	7662	7646	7524	7604	7590	7582
15	35XM	7825	7810	7790	7765	7735	7705	7692	7660	7635	7615	7590	7575	7665
16	30XH3A	7851	7845	7824	7793	7760	7727	7693	7657	7625	7650	7596	7522	7515
17	40XC	7855	7850	7830	7810	7794	7773	7758	7741	7711	7689	7656	7645	7634
18	40X3M	7850	7847	7830	7802	7784	7762	7748	7726	7704	7690	7679	7662	7651
19	40Г	7842	7836	7812	7790	7772	7757	7743	7730	7715	7702	7690	7676	7668
20	50Г2	7785	7780	7752	7726	7702	7691	7670	7652	7626	7601	7590	7572	7561
21	50C2Г	7729	7725	7703	7672	7639	7605	7570	7533	7495	7477	7442	7392	7380

Таблиця 7.5.46-Межа міцності сталей

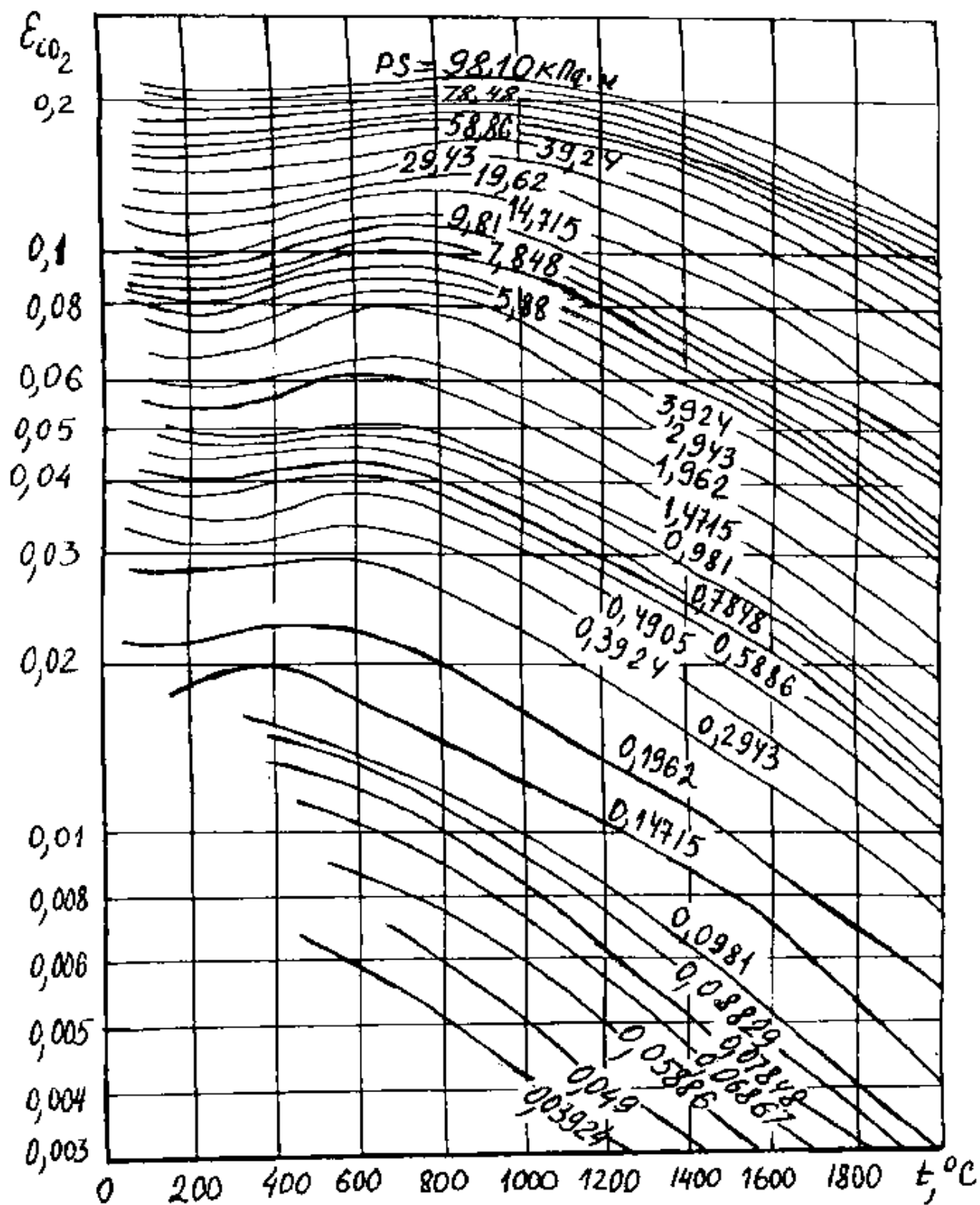
№ п/п	Марка сталі	Межа міцності, мН/м <sup>2</sup> , при температурі °С						
		20	100	200	300	400	500	600
1	15Х	510,4	495,2	501,3	485,3	478,2	420,2	294,1
2	15ХА	515,3	499,4	502,2	488,4	480,1	422,3	296,2
3	15ХМ	529,6	515,8	505,2	496,1	492,3	441,3	304,0
4	15ХФ	512,2	497,4	503,2	489,4	482,3	425,2	300,3
5	15М	511,4	496,2	500,2	487,2	480,5	422,3	298,2
6	20Х	520,2	511,2	504,1	495,2	491,1	438,2	302,7
7	12ХН2	450,1	435,2	480,4	478,2	452,6	398,8	303,2
8	12МХ	446,2	422,7	449,1	473,7	449,1	397,2	306,0
9	12ХМФ	490,3	451,1	451,1	400,5	431,5	343,2	215,7
10	30Х	570,3	560,2	540,3	535,4	505,7	480,3	452,0
11	30Г2	572,1	565,0	550,1	534,2	510,6	485,2	453,3
12	30ХГС	575,0	566,2	551,3	535,4	512,0	487,3	455,2
13	30ХМ	571,0	561,3	542,4	526,3	506,0	481,4	453,1
14	30ХН3А	574,0	563,2	544,8	531,5	508,7	483,2	454,6
15	35Г2	582,1	573,2	561,3	542,6	520,3	491,6	460,7
16	35ХМ	580,2	570,3	558,4	538,5	516,6	487,7	456,8
17	40ХС	595,4	580,5	567,6	551,7	530,8	595,9	464,1
18	40Х3М	596,7	581,8	569,9	553,1	532,2	496,2	465,2
19	40Г	597,2	582,1	570,2	554,3	533,4	497,5	466,6
20	50Г2	640,1	621,2	601,3	580,4	556,6	520,6	481,7
21	50С2Г	645,2	623,3	615,4	591,5	562,6	526,7	490,1

Таблиця 7.5.47-Модуль пружності сталей

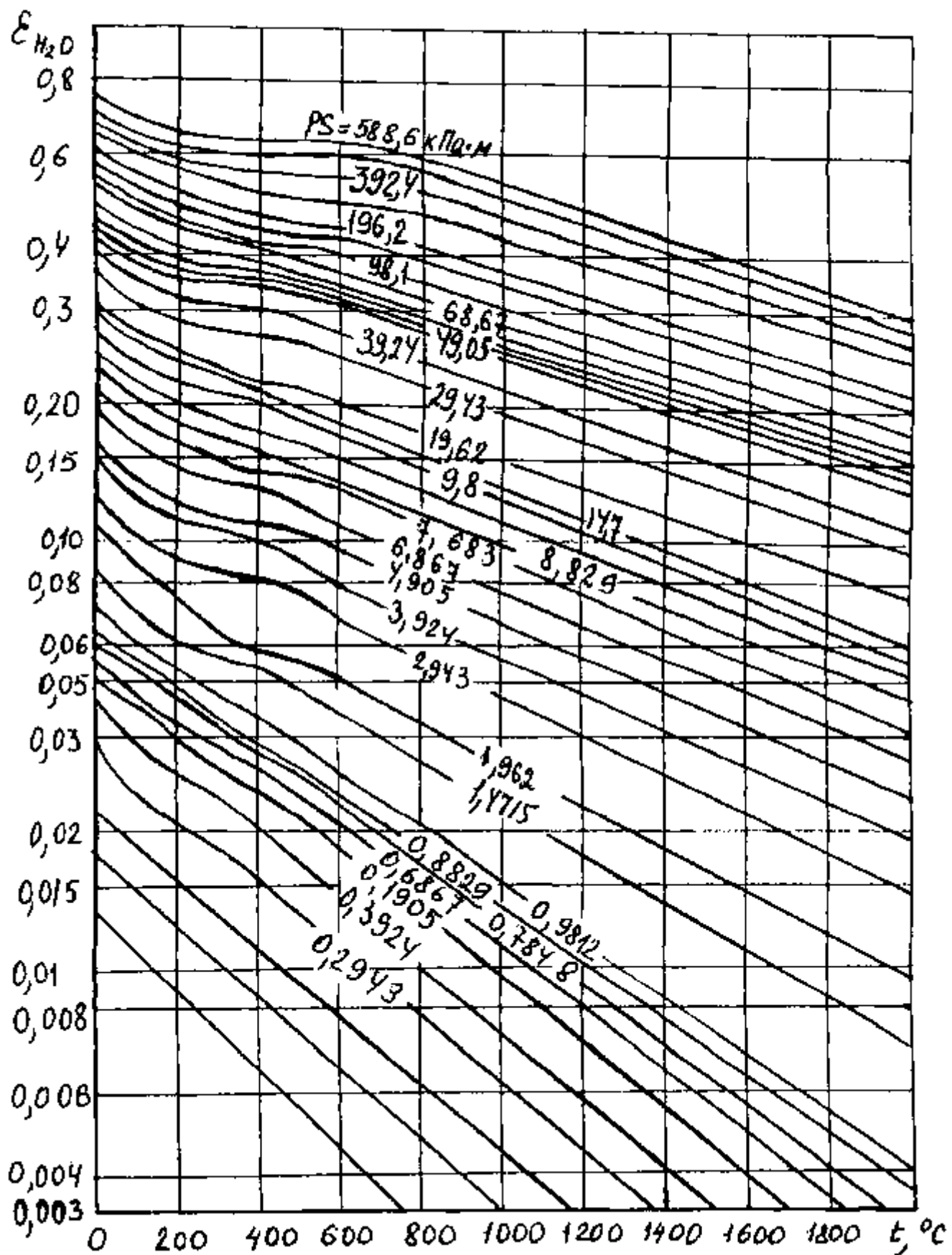
№ п/п	Марка сталі	Модуль пружності Е·10 <sup>4</sup> Мпа, при температурі °С				
		20	200	300	400	450
1	08кп	20,7	18,6	15,6	14,4	14,0
2	08	20,8	18,7	15,8	14,5	14,1
3	20	20,2	17,9	17,0	16,1	16,5
4	25	20,2	19,5	18,9	16,7	15,9
5	40	21,0	19,6	19,1	16,8	16,0
6	У8	20,8	19,6	18,8	16,5	15,6
7	У12	20,9	19,7	18,9	16,6	15,7
8	45	19,4	18,3	15,9	14,5	14,1
9	15Х	20,2	18,7	17,0	16,3	15,7
10	15ХА	30,4	18,9	17,3	16,4	15,9
11	15ХМ	20,3	18,8	17,1	16,2	15,6
12	15ХФ	20,1	18,6	16,8	15,9	14,8
13	15М	20,4	18,9	17,2	16,3	15,7
14	20Х	20,5	18,7	17,4	16,4	15,6
15	20Г	20,8	19,4	17,9	16,4	15,6
16	12ХН2	20,0	18,5	17,1	16,0	15,4
17	12МХ	20,1	18,6	17,2	16,2	15,5
18	12ХМФ	20,2	18,7	17,3	16,3	15,6
19	30Х	19,7	17,8	17,0	16,6	15,4
20	30Г2	19,9	17,6	17,1	16,7	15,6
21	30ХГС	19,8	17,7	17,2	16,9	15,9
22	30ХМ	21,3	20,8	20,1	19,2	15,8
23	30ХН3А	21,1	20,7	19,6	18,3	15,1
24	35Г2	21,2	20,6	19,5	18,0	15,3
25	35ХМ	21,3	20,8	20,1	19,2	15,7

Продовження таблиці 7.5.47

1	2	3	4	5	6	7
26	40ХС	20,7	20,0	19,2	18,3	15,2
27	40Х3М	20,5	19,6	18,7	16,8	14,9
28	40Г	21,4	19,8	18,9	17,0	15,8
29	50Г2	21,7	19,3	19,1	17,1	15,9
30	50С2Г	21,8	19,6	19,0	17,2	16,0

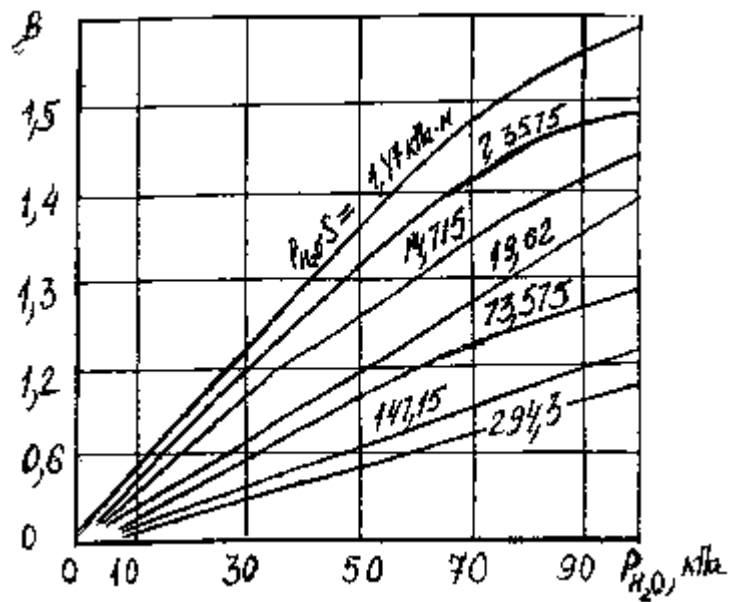


Малюнок 7.5.48-Ступінь чорноти вуглекислого газу

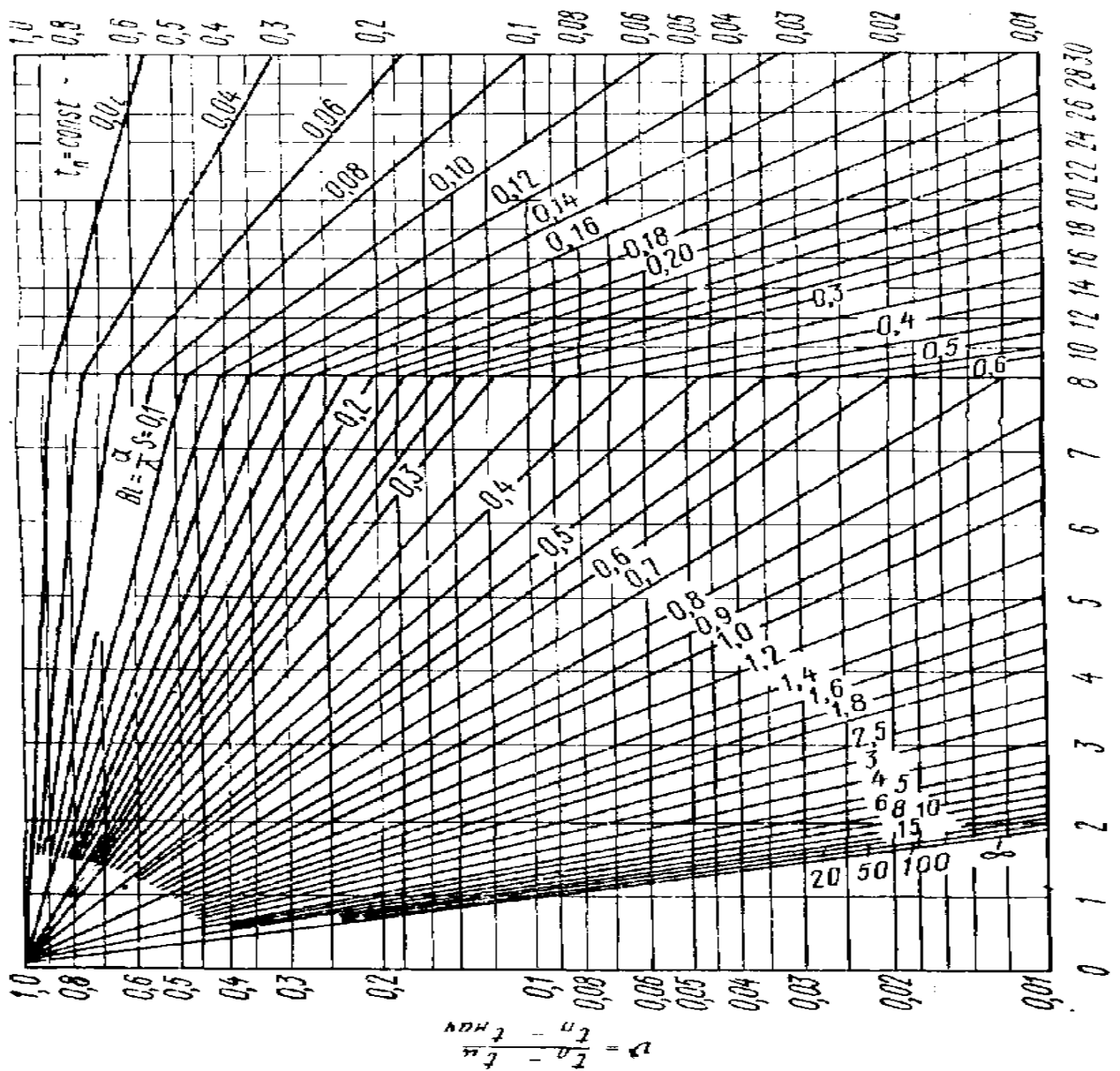


Малюнок 7.5.49-Ступінь чорноти водяного пару

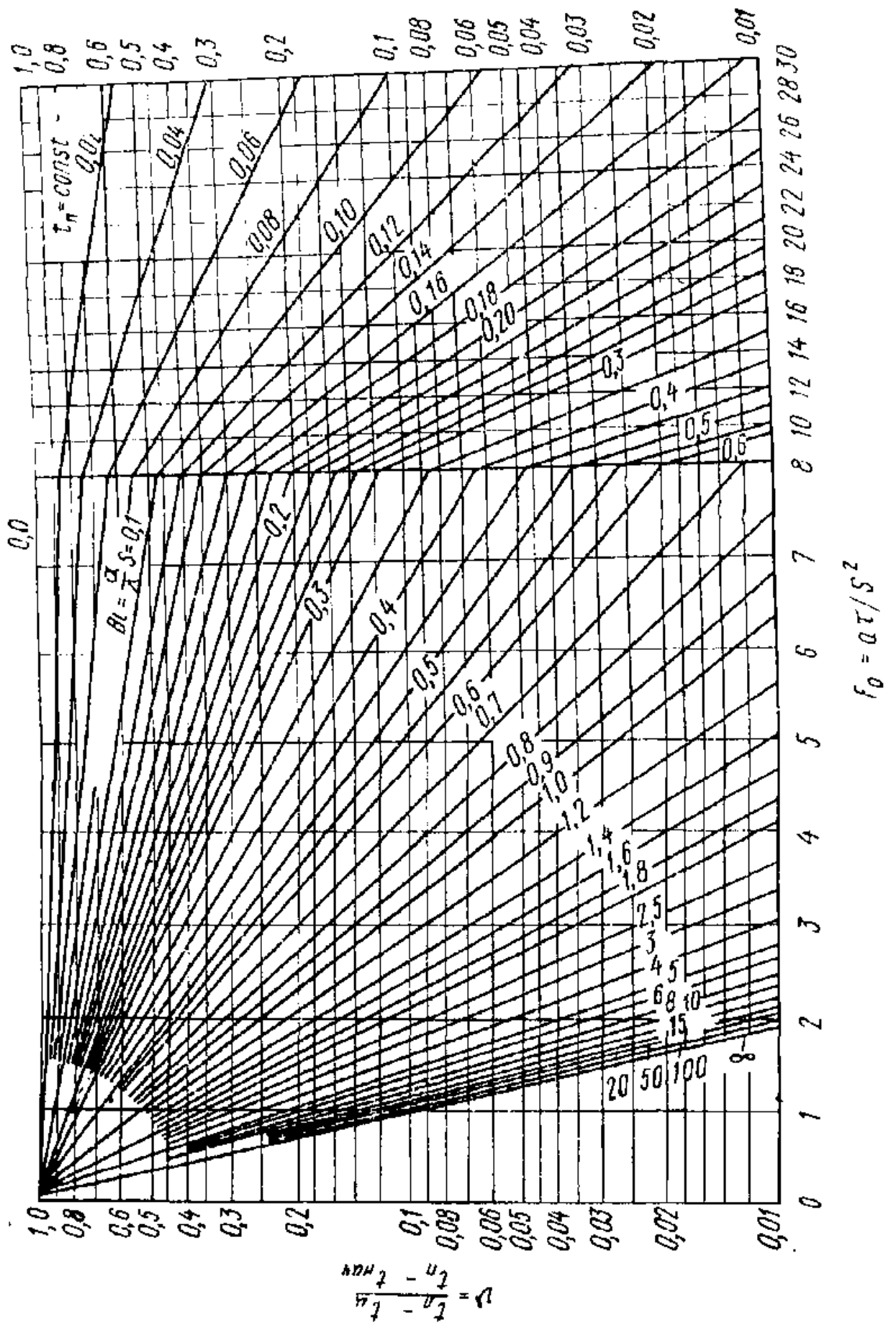




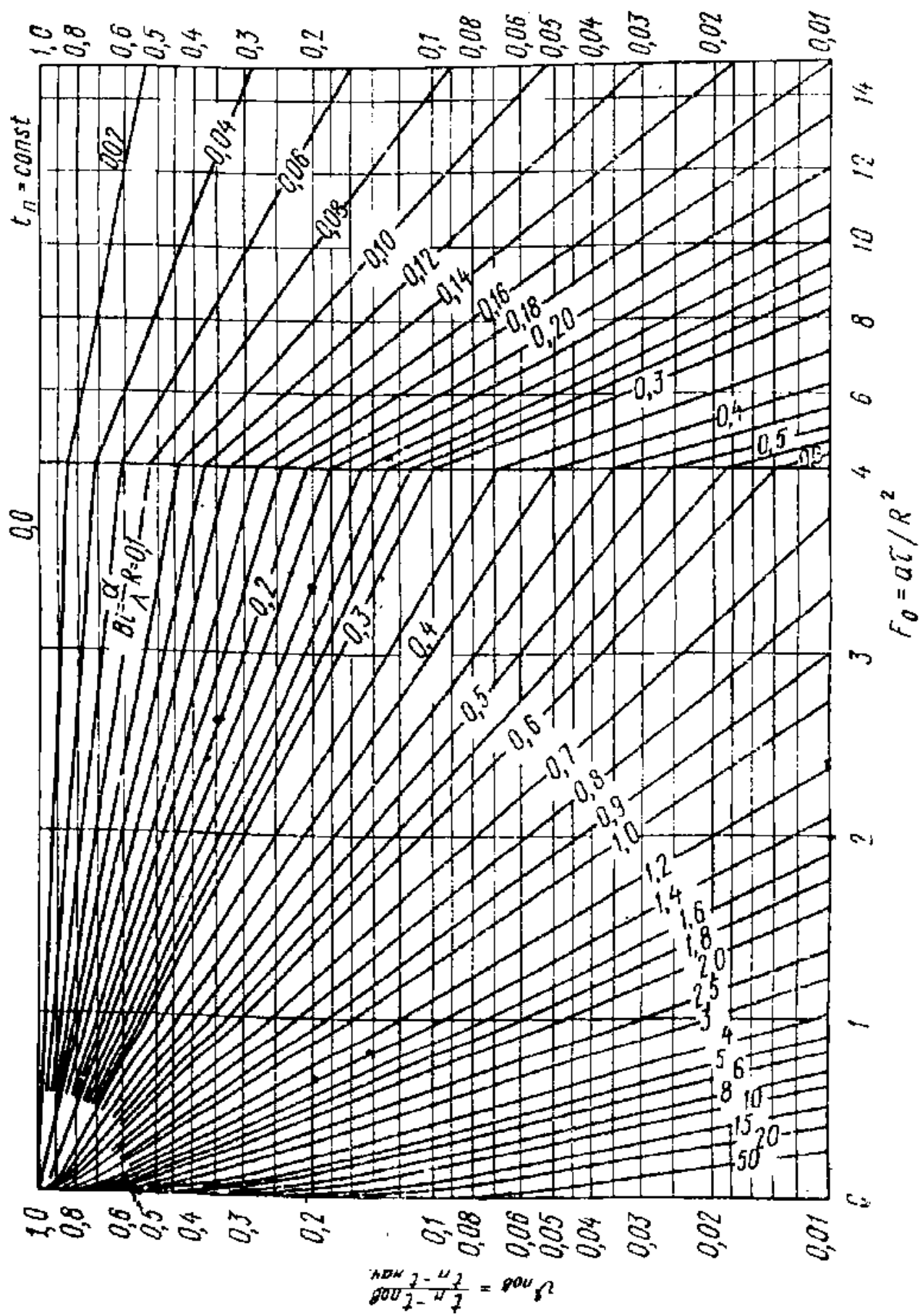
Малюнок 7.5.50-Поправочний коефіцієнт для водяного пару



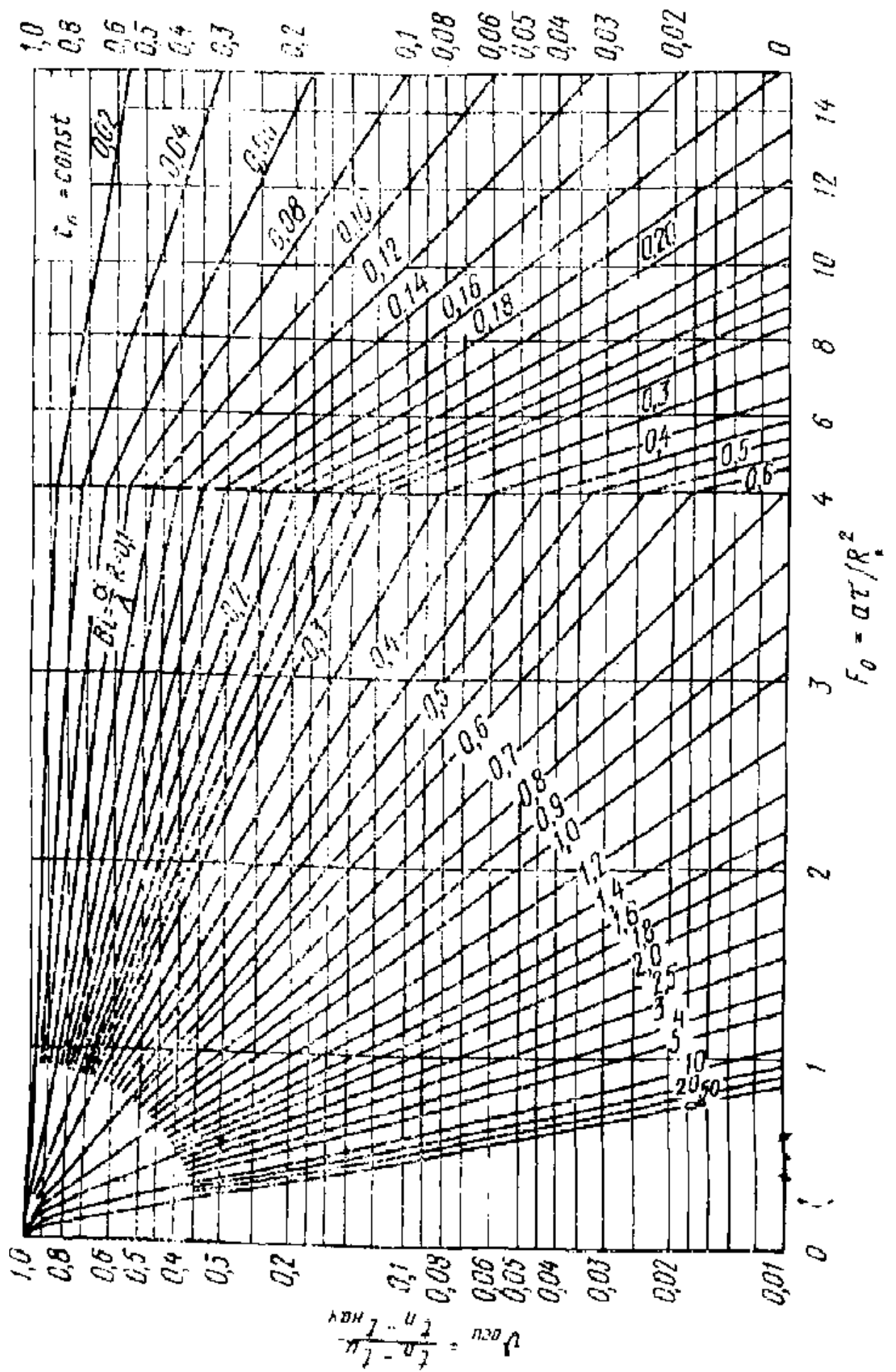
Малюнок 7.5.51-Графік для розрахунку нагрівання поверхні пластини



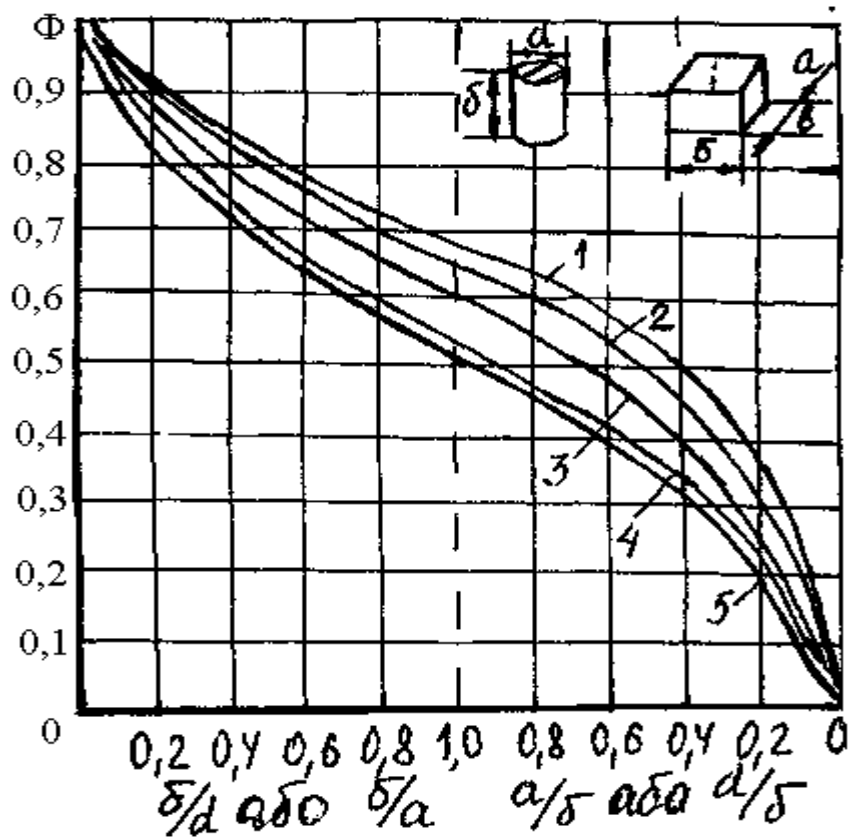
Малюнок 7.5.52-Грфік для розрахунку нагрівання центру пластини



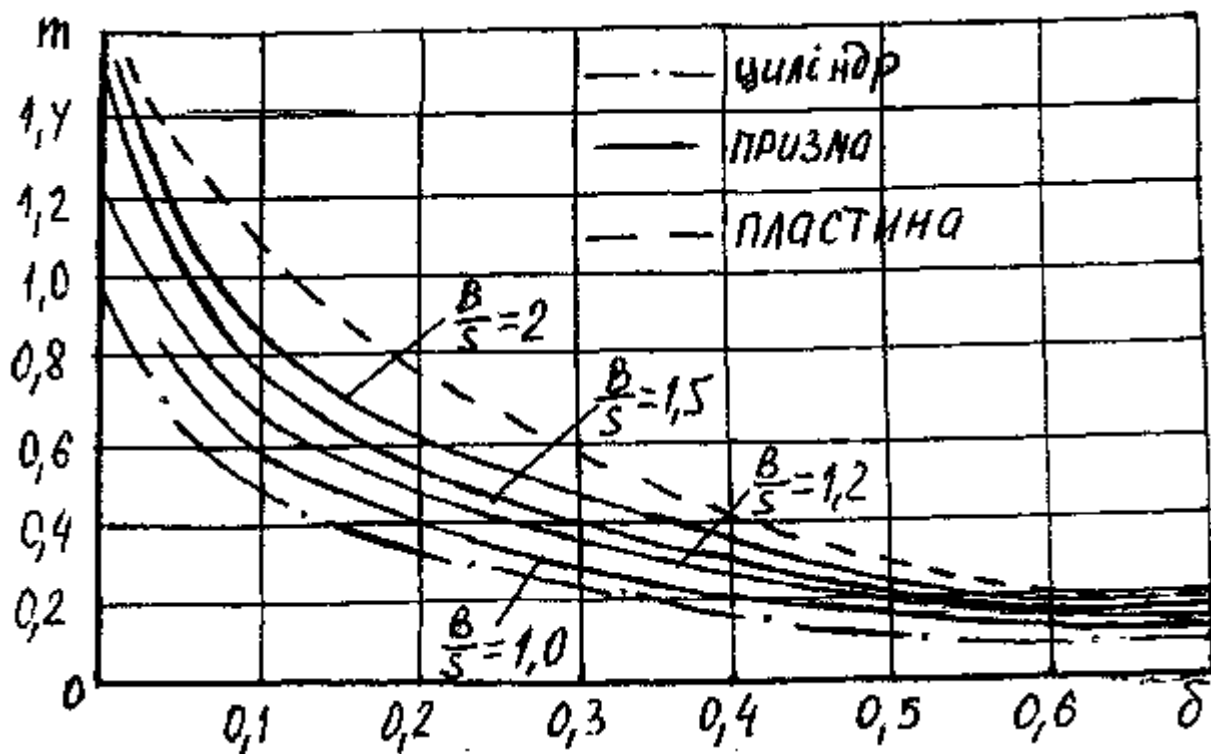
Малюнок 7.5.53-Г графік для розрахунку нагрівання поверхні циліндру



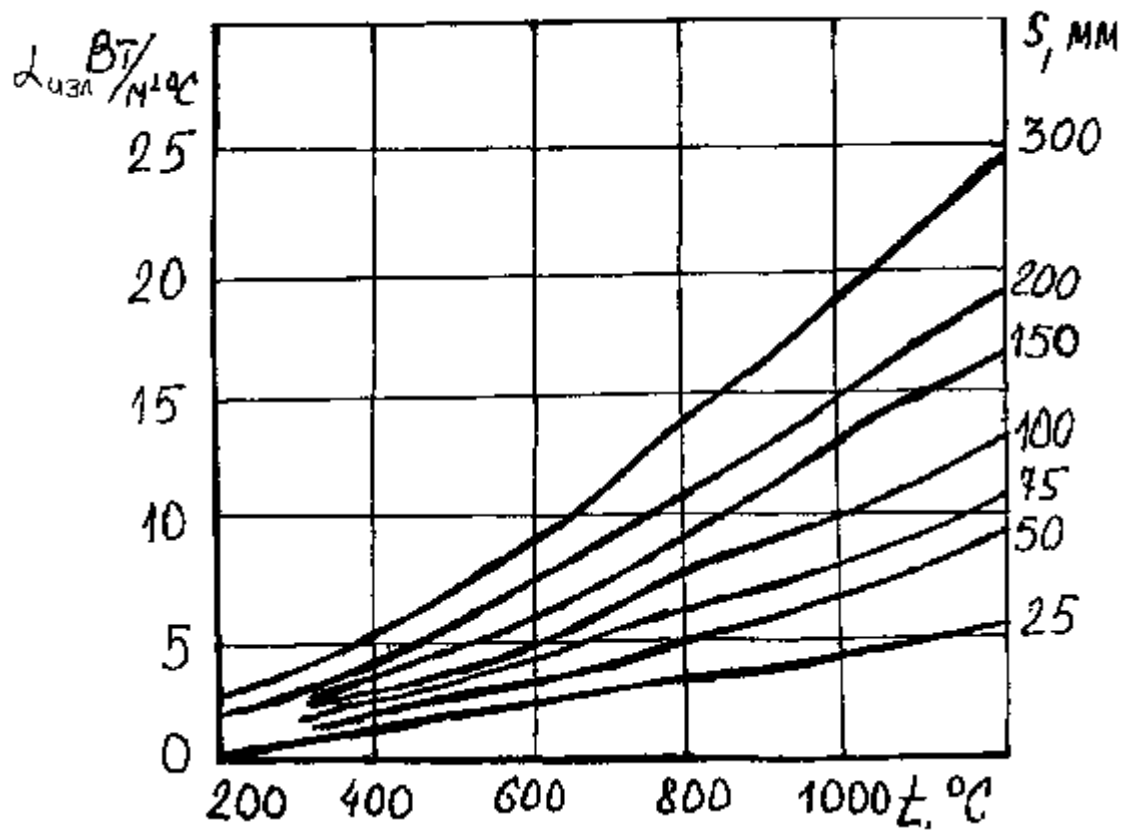
Малюнок 7.5.54-Графік для розрахунку нагрівання центру циліндру



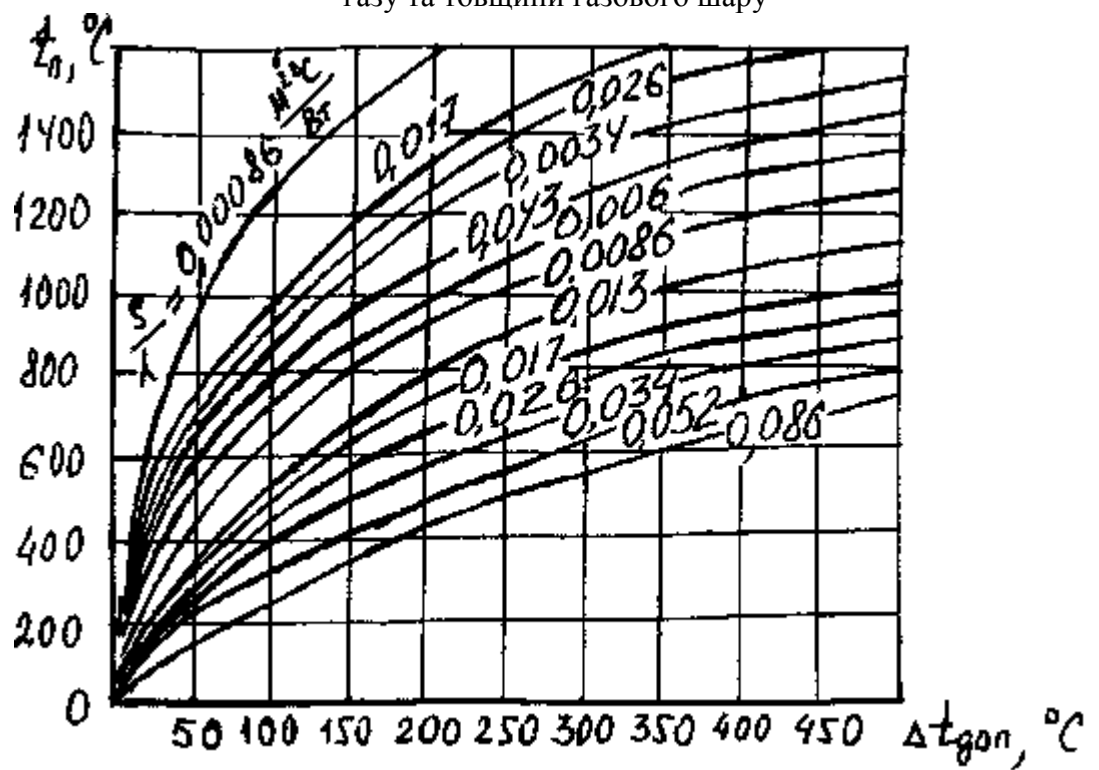
Малюнок 7.5.55-Коефіцієнт діафрагмування



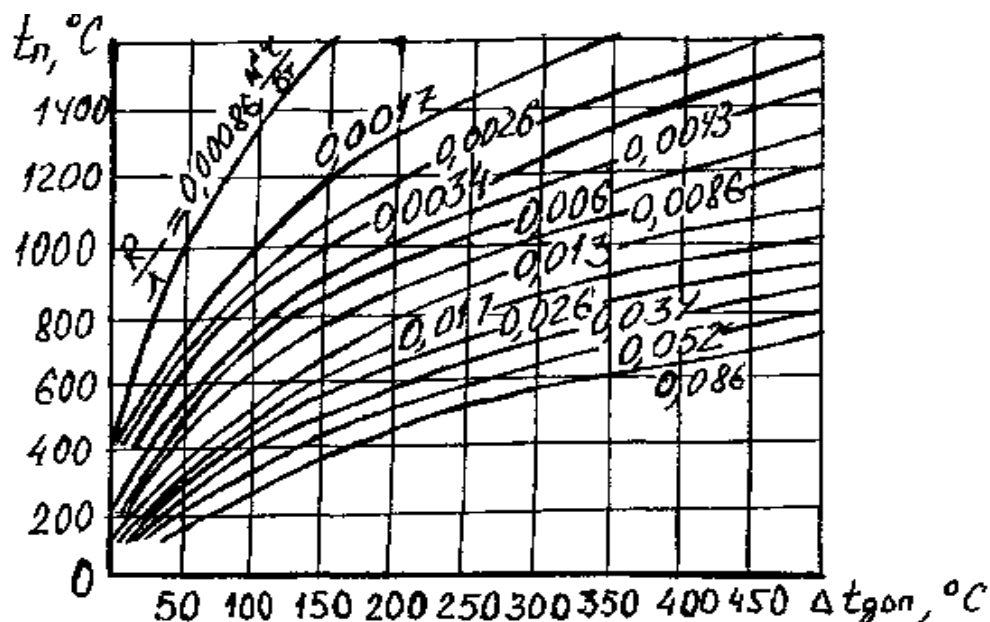
Малюнок 7.5.56-Графік для визначення терміну витримки



Малюнок 7.5.57-Графік залежності коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням від температури газу та товщини газового шару



Малюнок 7.5.58-Допустима температура печі для пластини



Малюнок 7.5.59-Допустима температура печі для циліндру

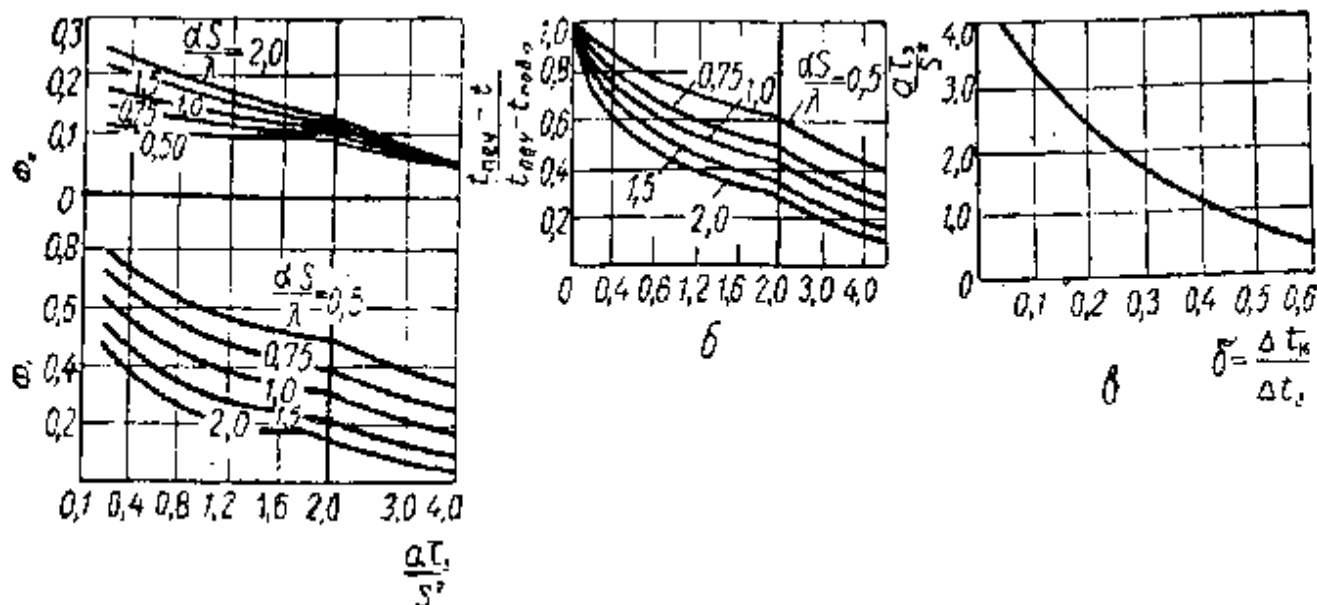
Таблиця 7.5.60-Значення  $\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$

$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$
0	55,55	300	1078	600	5808	900	18932	1200	47077
10	64,14	310	1155	610	6079	910	19586	1210	48369
20	73,70	320	1237	620	6359	920	20256	1220	49687
30	84,29	330	1322	630	6649	930	20944	1230	51031
40	95,98	340	1412	640	6948	940	21649	1240	52403
50	108,85	350	1506	650	7258	950	22372	1250	53802
60	122,96	360	1606	660	7578	960	23113	1260	55229
70	138,41	370	1709	670	7908	970	23872	1270	56684
80	155,27	380	1818	680	8248	980	24649	1280	58168
90	173,63	390	1932	690	8600	990	25446	1290	59681
100	193,57	400	2051	700	8963	1000	26261	1300	61223
110	215,18	410	2176	710	9337	1010	27096	1310	62795
120	238,54	420	2306	720	9723	1020	27951	1320	64397
130	263,77	430	2442	730	10121	1030	28826	1330	66029
140	290,94	440	2584	740	10530	1040	29721	1340	67692
150	320,16	450	2732	750	10952	1050	30637	1350	69386
160	351,52	460	2887	760	11387	1060	31573	1360	71112
170	385,14	470	3048	770	11834	1070	32531	1370	72870
180	421,11	480	3215	780	12295	1080	33511	1380	74661
190	459,54	490	3389	790	12768	1090	34513	1390	76484
200	500,55	500	3570	800	13256	1100	35537	1400	78340
210	544,24	510	3759	810	13757	1110	36584	1410	80230
220	590,73	520	3955	820	14272	1120	37653	1420	82154
230	640,14	530	4158	830	14801	1130	38746	1430	84112
240	692,58	540	4369	840	15345	1140	39863	1440	86105
250	748,18	550	4588	850	15904	1150	41003	1450	88134
260	807,07	560	4815	860	16479	1160	42168	1460	90197
270	869,36	570	5050	870	17068	1170	43358	1470	92297
280	935,19	580	5294	880	17673	1180	44572	1480	94434
290	1004,69	590	5547	890	18294	1190	45812	1490	96607

Таблиця 7.5.61-Значення  $K_2$  та  $K_3$

Крите- рій Ві	Плита		Циліндр		Куля		Квадратна призма	
	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>
0	2	3	2	2	2	1,67	1,5-	2,0
0,02	1,999	3	1,905	2	1,99	1,67	-	-
0,08	1,99	2,984	1,98	1,994	1,97	1,665	-	-
0,10	1,985	2,98	1,976	1,991	1,967	1,663	1,475	2,0
0,20	1,968	2,74	1,951	1,984	1,932	1,656	1,438	1,985
0,30	1,955	2,969	1,931	1,975	1,914	1,638	-	-
0,40	1,941	2,962	1,910	1,967	1,89	1,636	1,430	1,945
0,50	1,928	2,955	1,890	1,963	1,864	1,634	-	-
0,60	1,917	2,949	1,87	1,958	1,84	1,626	1,387	1,930
0,70	1,905	2,943	1,85	1,951	1,816	1,62	-	-
0,80	1,894	2,937	1,833	1,945	1,794	1,616	1,358	1,915
0,90	1,884	2,932	1,818	1,94	1,773	1,612	-	-
1,00	1,864	2,926	1,80	1,935	1,752	1,608	1,350	1,90
2,00	1,802	2,883	1,675	1,893	1,57	1,57	1,262	1,85
3,00	1,757	2,858	1,591	1,867	1,58	1,545	1,220	1,815
4,00	1,726	2,840	1,534	1,848	1,39	1,525	1,178	1,790
5,00	1,703	2,827	1,49	1,835	1,34	1,511	1,144	1,775
6,00	1,686	2,817	1,46	1,825	1,30	1,50	1,130	1,760
7,00	1,673	2,811	1,436	1,818	1,26	1,486	-	-
8,00	1,663	2,804	1,417	1,814	1,23	1,484	1,117	1,740
9,00	1,654	2,798	1,400	1,807	1,21	1,482	-	-
10,00	1,647	2,795	1,387	1,803	1,19	1,478	1,107	1,730
20,00	1,616	2,755	1,321	1,782	1,10	1,46	1,040	1,715
30,00	1,599	2,468	1,30	1,775	1,07	1,452	-	-
40,00	1,592	2,764	1,29	1,771	1,05	1,459	-	-
50,00	1,588	2,762	1,28	1,769	1,04	1,446	-	-
60,00	1,586	2,76	1,273	1,767	1,03	1,444	1,03	1,695
80,00	1,581	2,758	1,267	1,765	1,02	1,442	-	-
100,00	1,579	2,757	1,263	1,764	1,01	1,44	1,02	1,690
-	1,5708	2,752	1,25	1,762	1,00	1,433	1,0	1,68





Малюнок 7.5.62-Графіки для витримки металу на монолітному ході

Таблиця 7.5.63-Конструктивні дані блочних керамічних рекуператорів

Поверхня нагрівання блоку (на димовій стороні)	0,161м <sup>2</sup>
Площа поперечного перерізу для проходу повітря	0,013м <sup>2</sup>
Теж саме для проходу диму	0,0274м <sup>2</sup>
Еквівалентні діаметриповітряних каналів	0,0565м
Теж саме димових каналів	0,158м
Живий переріз повітряних каналів в долях повного перерізу рекуператору	0,21
Теж саме каналів	0,34

Таблиця 7.5.64-Значення коефіцієнтів А та В

Коефіцієнт	Температура $t_{cp}$ , °C					
	100	200	300	400	500	600
А	1,98	2,29	2,6	2,84	3,12	3,41
В	0,841	0,965	1,1	1,19	1,31	1,44

### 7.6. Запитання і завдання для самоконтролю.

1. Від чого залежить тривалість нагрівання металу?
2. Як впливає рівномірність нагрівання на якість термообробки та собівартість обробки тиском?
3. Які фактори впливають на швидкість нагрівання сталі?
4. Від чого залежить величина температурних напружень в заготовці?
5. Які критерії використовуються для розподілу тіл на масивні та тонкі?
6. Що являється метою розрахунку нагрівання металу?
7. Від чого залежить розрахункова товщина заготовки?
8. Як попередити виникнення тріщин в заготовці?
9. Від чого залежать розміри печі?
10. В яких випадках використовують підвісне склепіння?
11. Як визначається допустимий перепад температур в заготовці?
12. Як зменшити окислення металу в печі?
13. Який негативний вплив викликає знеуглецювання сталі?
14. Як впливає окалина на процес нагрівання та обробки тиском?
15. Основні вимоги до пристроїв для спалювання палива.
16. За якими ознаками класифікують пальники?
17. За рахунок чого утворюється коротке та довге полум'я в пальниках?
18. Принцип дії радіаційних труб.
19. Принцип дії форсунки.
20. За якими параметрами вибирають пальники та форсунки?
21. Призначення рекуператору та регенератору.
22. Недоліки регенераторів.
23. Протиточна та прямоточна схема руху продуктів згоряння та повітря в теплообмінних пристроях.
24. Що є основною метою розрахунку рекуператора?
25. Конструкція та принцип дії голчастих рекуператорів.
26. Основні методи розрахунку нагрівання масивних заготовок.
27. Конструкція та принцип дії камерних печей із нерухомим подом.
28. Особливості конструкції камерних печей із рухомим подом.
29. Конструкція та принцип дії методичних печей.
30. Конструкція та принцип дії барабанних сушил.
31. Сушила для форм та стержнів.
32. Як проходить процес сушки форм?

### 7.7 Типові задачі із розв'язанням

**Задача 1.** Визначити час нагрівання заготовки із сталі 08 діаметром  $d=30\text{мм}$  від температури  $t_{\text{п}}=20^{\circ}\text{C}$  до температури  $t_{\text{к}}=900^{\circ}\text{C}$ . Температура печі  $t_{\text{печ}}=1000^{\circ}\text{C}$ , приведений коефіцієнт випромінювання піч-метал  $C_{\text{п.м.}}=3,6\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K}^4)$ , нагрівання двохстороннє.

**Розв'язання.** Для більш точного визначення часу розділимо процес нагрівання на три температурних інтервали:

I- від  $t_{\text{п}}=20^{\circ}\text{C}$  до  $t_1=600^{\circ}\text{C}$ ;

II- від  $t_1=600^{\circ}\text{C}$  до  $t_{\text{п}}=800^{\circ}\text{C}$ ;

III- від  $t_{\text{п}}=800^{\circ}\text{C}$  до  $t_{\text{к}}=900^{\circ}\text{C}$ .

Так як розміри дуже малі, то основною формулою буде рівняння для тонкого тіла:

$$\tau = \frac{S\rho C_p}{K_1\alpha} \ln \frac{t_{\text{ПЕЧ}} - t_{\text{П}}}{t_{\text{ПЕЧ}} - t_{\text{К}}},$$

де  $S$ - розрахункова товщина тіла, м. Для двохстороннього нагрівання

$$S=0,5d=0,5\cdot0,03=0,015\text{м}.$$

$\rho$ - густина сталі, кг/м<sup>3</sup>. Визначаємо як середню в кожному інтервалі температур, користуючись даними табл.6.5.39:

$$\rho_I = 0,5(\rho_{20^\circ\text{C}} + \rho_{600^\circ\text{C}}) = 0,5(7871 + 7668) = 7770 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{II} = 0,5(\rho_{600^\circ\text{C}} + \rho_{800^\circ\text{C}}) = 0,5(7668 + 7598) = 7635 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{III} = 0,5(\rho_{800^\circ\text{C}} + \rho_{900^\circ\text{C}}) = 0,5(7598 + 7602) = 7600 \text{ кг/м}^3;$$

$C_p$ - середня теплоємність сталі, Дж/(кг·К), визначаємо для кожного інтервалу температур за даними табл.6.5.38:

$$C_I = \frac{i_{600^\circ\text{C}} - i_{20^\circ\text{C}}}{t_I - t_{II}} = \frac{354,2 - 8,7}{600 - 20} = 0,53 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}) = 590 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$C_{II} = \frac{i_{800^\circ\text{C}} - i_{600^\circ\text{C}}}{t_{II} - t_I} = \frac{542,61 - 354,2}{800 - 600} = 0,942 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}) = 942 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$C_{III} = \frac{i_{900^\circ\text{C}} - i_{800^\circ\text{C}}}{t_{III} - t_{II}} = \frac{625,51 - 542,61}{900 - 800} = 0,829 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}) = 829 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

$\alpha$ - середній коефіцієнт тепловіддачі від печі до заготовки, Вт/(м<sup>2</sup>·К). визначаємо за рівнянням:

$$\begin{aligned} \alpha_{I_C} &= 0,5(\alpha_I + \alpha_{II}) = 0,5C_{n.m.} \left[ \frac{\left(\frac{T_{печ}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_I}{100}\right)^4}{t_{печ} - t_I} + \frac{\left(\frac{T_{печ}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{II}}{100}\right)^4}{t_{печ} - t_{II}} \right] = \\ &= 0,5 \cdot 3,6 \left[ \frac{\left(\frac{1000 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{600 + 273}{100}\right)^4}{1000 - 600} + \frac{\left(\frac{1000 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100}\right)^4}{1000 - 20} \right] = \\ &= 140,04 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}) \\ \alpha_{II_C} &= 0,5(\alpha_I + \alpha_{II}) = 0,5C_{n.m.} \left[ \frac{\left(\frac{T_{печ}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_I}{100}\right)^4}{t_{печ} - t_I} + \frac{\left(\frac{T_{печ}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{II}}{100}\right)^4}{t_{печ} - t_{II}} \right] = \\ &= 0,5 \cdot 3,6 \left[ \frac{\left(\frac{1000 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{600 + 273}{100}\right)^4}{1000 - 600} + \frac{\left(\frac{1000 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{900 + 273}{100}\right)^4}{1000 - 800} \right] = \\ &= 208,98 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}); \end{aligned}$$

$$\alpha_{III C} = 0,5 C_{n.m.} \left[ \frac{\left( \frac{T_{печ}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{II}}{100} \right)^4}{t_{печ} - t_{II}} + \frac{\left( \frac{T_{печ}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_K}{100} \right)^4}{t_{печ} - t_K} \right] =$$

$$= 0,5 \cdot 3,6 \left[ \frac{\left( \frac{1000+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{800+273}{100} \right)^4}{1000-800} + \frac{\left( \frac{1000+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{900+273}{100} \right)^4}{1000-900} \right] =$$

$$= 24881 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$K_1$ - коефіцієнт форми заготовки. Для циліндру  $K_1=2$ .

Термін нагрівання в кожному періоді,с:

$$\tau_I = \frac{0,015 \cdot 7770 \cdot 590 \cdot \ln \frac{100-20}{1000-600}}{2 \cdot 140,4} = 222 \text{ с};$$

$$\tau_{II} = \frac{0,015 \cdot 7635 \cdot 942 \cdot \ln \frac{1000-600}{1000-800}}{2 \cdot 208,98} = 178 \text{ с};$$

$$\tau_{III} = \frac{0,015 \cdot 7600 \cdot 829 \cdot \ln \frac{1000-800}{1000-900}}{2 \cdot 248,87} = 156 \text{ с};$$

Загальний час нагрівання, с:

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} + \tau_{III} = 222 + 178 + 156 = 556 \text{ с}.$$

**Задача 2.** Визначити час нагрівання масивного тіла за графіками при постійній температурі печі  $t_{печ}=1300^\circ\text{C}$  та коефіцієнті випромінювання  $C_{п.м.}=4,07 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ . Діаметр заготовки  $d=0,6 \text{ м}$ , марка сталі 30ХНЗ, початкова температура заготовки  $t_n=30^\circ\text{C}$ , кінцева -  $t_k=1280^\circ\text{C}$ .

**Розв'язання.** Розділимо процес нагрівання на три періоди:

I- від  $t_n=30^\circ\text{C}$  до  $t_I=1000^\circ\text{C}$ ;

II- від  $t_I=1000^\circ\text{C}$  до  $t_{II}=1200^\circ\text{C}$ ;

III- від  $t_{II}=1200^\circ\text{C}$  до  $t_k=1280^\circ\text{C}$ .

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі у першому періоді:

$$\alpha_{IC} = 0,5 C_{n.m.} \left[ \frac{\left( \frac{T_{печ}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{II}}{100} \right)^4}{t_{печ} - t_{II}} + \frac{\left( \frac{T_{печ}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_I}{100} \right)^4}{t_{печ} - t_I} \right] =$$

$$= 0,5 \cdot 4,07 \left[ \frac{\left( \frac{1000+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{30+273}{100} \right)^4}{1300-30} + \frac{\left( \frac{1300+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{1000+273}{100} \right)^4}{1300-1000} \right] =$$

$$= 33504 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Середній коефіцієнт теплопровідності в першому періоді:

$$\lambda_{Ic} = \frac{\lambda_{30^{\circ}C} + \lambda_{30^{\circ}C} + \lambda_{1200^{\circ}C}}{3} = \frac{35,5 + 33,5 + 29,05}{3} = 32,01 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності при певній температурі, взяли із табл. 6.5.42.

Число Біо:

$$B_I = \frac{\alpha_{Ic} R}{\lambda_{Ic}} = \frac{335 \cdot 0,5 \cdot 0,6}{32,01} = 3,14.$$

Температурний критерій поверхні заготовки:

$$\Phi_{\Pi_I} = \frac{t_{ПЕЧ} - t_I}{t_{ПЕЧ} - t_{II}} = \frac{1300 - 1000}{1300 - 30} = 0,236$$

За мал.6.5.53 знаходимо критерій Фур'є:

$$F_{O_I} = 0,24.$$

За мал.6.5.54 знаходимо температурний критерій центру заготовки:

$$F_{Ц_I} = 0,52.$$

Тоді температура центру заготовки у першому періоді, °С:

$$t_{Ц_I} = t_{ПЕЧ} - \Phi_{Ц_I} (t_{ПЕЧ} - t_{II}) = 640 + 0,5(1000 - 640) = 820^{\circ} \text{C}.$$

Середня теплоємність заготовки у першому періоді, Дж/(кг·К):

$$C_{C_I} = \frac{i_{t_I} - i_{t_{II}}}{t_I - t_{II}} = \frac{698,1 - 15}{1000 - 30} = 0,704 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} = 704,$$

де  $i$ -теплотміст за певної температури, взяли із табл.6.5.43.

середній коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К):

$$\lambda_{C_I} = \frac{\lambda_{30^{\circ}C} + \lambda_{30^{\circ}C} + \lambda_{1000^{\circ}C} + \lambda_{640^{\circ}C}}{4} = \frac{35,5 + 33,5 + 23,05 + 31}{4} = 26,76 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Коефіцієнт температуровідності, м<sup>2</sup>/с:

$$a = \frac{\lambda_{C_I}}{C_{C_I} \cdot \rho_{C_I}} = \frac{26,78}{704 \cdot 7686} = 5 \cdot 10^{-6},$$

де-  $\rho_{C_I}$  середня густина сталі в першому періоді, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{C_I} = 0,5(\rho_{t_{II}} + \rho_{t_I}) = 0,5(7851 + 7522) = 7686.$$

Значення густини сталі взяли із табл.6.5.45.

Час нагрівання у першому періоді, с:

$$\tau_I = F_{O_I} \frac{R^2}{a} = 0,24 \cdot \frac{0,3^2}{5 \cdot 10^{-6}} = 4320.$$

Аналогічно визначаємо час нагрівання у другому та третьому періодах.

Загальний час нагрівання, с:

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} + \tau_{III} = 4320 + 1285 + 1813 = 7418 \text{ с}.$$

**Задача 3.** Визначити час нагрівання заготовки за методом теплової діаграми. Марка сталі У8, розмір заготовки 2S=0,7×0,7м, початкова температура заготовки  $t_{II}=25^{\circ}\text{C}$ , кінцева температура  $t_K=1250^{\circ}\text{C}$ , коефіцієнт випромінювання  $C_{П.М.}=3,85 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ , температура печі  $t_{ПЕЧ}=1280^{\circ}\text{C}$ .

**Розв'язання.** Розділимо процес нагрівання на три періоди:

I- від  $t_{II}=25^{\circ}\text{C}$  до  $t_I=1000^{\circ}\text{C}$ ;

II- від  $t_I=1000^{\circ}\text{C}$  до  $t_{II}=1170^{\circ}\text{C}$ ;

III- від  $t_{II}=1170^{\circ}\text{C}$  до  $t_K=1250^{\circ}\text{C}$ .

Час нагрівання визначається за рівнянням:

$$\tau = \frac{\Delta i S \rho_C}{K_1 q_{cp}},$$

**Задача 4.** Визначити втрати тепла через футеровку печі, яка складається із двох шарів: внутрішнього – шамот товщиною  $\delta_{ш}=0,23\text{м}$ , зовнішній легковаговий шамот товщиною  $\delta_{шл}=0,175\text{м}$ . Розміри печі із підвісним склепінням: ширина  $B=5,0\text{м}$ , довжина  $l=6,3\text{м}$ , висота  $H=1,4\text{м}$ . Температура внутрішньої поверхні футеровки  $t'_{cm} = 823^\circ\text{C}$ , зовнішньої -  $t''_{cm} = 20^\circ\text{C}$ . Термін роботи печі  $\tau=1589\text{с}$ .

**Розв'язання.** Втрати тепла визначаються за рівнянням

$$Q = \frac{F_{cp}(t'_{cm} - t''_{cm})\tau}{\frac{\delta_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{\delta_{шл}}{\lambda_{шл}} + \frac{1}{\alpha}},$$

де  $\lambda_{ш}$ - теплопровідність шамоту при його середній температурі:

$$\lambda_{ш} = 0,7 + 6,4 \cdot 10^{-4} t_{ш}^c = 0,7 + 6,4 \cdot 10^{-4} \cdot 623 = 1,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$t_{ш}^c$  – середня температура шамоту,  $^\circ\text{C}$ ;

$$t_{ш}^c = 0,5[0,5(t'_{cm} + t''_{cm}) + t'_{cm}] = 0,5[0,5(823 + 20) + 823] = 623.$$

$\lambda_{шл}$ - теплопровідність легковагового шамоту:

$$\lambda_{шл} = 0,12 + 1,6 \cdot 10^{-4} t_{шл}^c = 0,12 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 221 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$t_{шл}^c$  - середня температура легковагового шамоту,  $^\circ\text{C}$

$$t_{шл}^c = 0,5[0,5(t'_{cm} + t''_{cm}) + t''_{cm}] = 0,5[0,5(823 + 20) + 20] = 221$$

$\alpha$ - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні печі до повітря.

$$\alpha = 10 \dots 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Приймаємо  $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

$F_{ф}$ - площа поверхні футеровки,  $\text{м}^2$ :

$$F_{ф} = F_{бс} + F_{тс} + F_{скл} = 2LH + 2BH + BL = 2 \cdot 6,5 \cdot 1,4 + 2 \cdot 5 \cdot 1,4 + 5 \cdot 6,3 = 112,7.$$

$$Q = \frac{63,7 \cdot (823 - 20) \cdot 1589}{\frac{0,23}{1,1} + \frac{0,175}{0,15} + \frac{1}{10}} = 51,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

**Задача 5.** Визначити втрати тепла із відпрацьованими газами, якщо температура газів  $t_2=700^\circ\text{C}$ , об'єм продуктів згоряння  $V_{\partial}=10\text{м}^3/\text{м}^3$ , витрати газу  $B=2\text{м}^3/\text{с}$ , термін дії печі,  $\tau=20000\text{с}$ . Теплота згоряння газу  $Q_n^p=28000\text{кДж}/\text{м}^3$ .

**Розв'язання.** Втрати тепла, Дж:

$$Q = V_{\partial} \cdot B \cdot i_{\partial} \cdot \tau = 10 \cdot 2 \cdot 1028 \cdot 20000 = 4112 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

де  $i_{\partial}$ - теплотіст відпрацьованих газів. За табл. знаходимо теплотіст газу при

$t_2=700^\circ\text{C}$  для першої групи палива:

$$i_{\partial}=1028\text{кДж}/\text{м}^3.$$

**Задача 6.** Підібрати палиник для згоряння природного газу із теплотою згоряння  $Q_n^p=35000 \text{ кДж}/\text{м}^3$ . Витрати газу  $B=700 \text{ м}^3/\text{год}$ , температура підігрівання повітря  $t_{п}=350^\circ\text{C}$ , дійсний об'єм повітря  $L_{д}=9,8 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Пальники встановлено в трьох зонах методичної печі шириною  $B=4,0 \text{ м}$ .

**Розв'язання.** В методичних печах для рівномірного нагрівання металу використовують довгополум'яні пальники типу труба в трубі.

Визначимо кількість пальників

$$n = z \left( \frac{B_T}{l} + 1 \right) = 3 \left( \frac{4}{1250} + 1 \right) = 12,6$$

Приймаємо  $n=12$ .

Потужність одного пальника для холодного повітря,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

$$V_{nx} = \frac{BL_d}{n} = \frac{700 \cdot 9,8}{12} = 569$$

Потужність одного пальника при використанні підігрітого повітря,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$V_{nn} = V_{nx} \sqrt{\frac{293 + t_n}{293}} = 569 \sqrt{\frac{293 + 350}{293}} = 798 \text{ м}^3/\text{год} = 0,22$$

За мал. 6.5.13 для тиску повітря  $P_n=1,2$  кПа та потужності  $0,22 \text{ м}^3/\text{с}$  повітря вибираємо пальник типу ДВС110.

**Задача 7.** Підібрати форсунку низького тиску для спалювання  $26 \text{ кг/год}$  мазуту. Коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha=1,2$ , тиск повітря попереду форсунки  $P_n=4,2$  кПа.

**Розв'язання.** Витрати мазуту за 1 с,  $\text{кг/с}$ :

$$V_m = 26 / 3600 = 0,0072.$$

За мал. 6.5.17 вибираємо найближчу стандартну форсунку. При витратах мазуту  $V_m = 0,0072 \text{ кг/с}$ , тиску повітря  $P_n=4,2$  кПа та  $\alpha=1,2$  спалювання мазуту забезпечує форсунка Ду100.

**Задача 8.** Визначити число блоків керамічного рекуператору для підігрівання повітря, якщо витрати палива  $B=6,11 \text{ м}^3/\text{с}$ , дійсний об'єм повітря  $L_d=0,785 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , об'єм диму  $V_d=1,63 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , температура підігрівання повітря  $t_n''=550$  °С, температура холодного повітря  $t_n'=20$  °С, температура відпрацьованих газів на виході із печі  $t_n'=950$  °С.

**Розв'язання.** Необхідний об'єм повітря,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$V_n = B \cdot L_d = 6,11 \cdot 0,785 = 4,8$$

Розрахунковий об'єм повітря,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$V_B^X = V_B + n \cdot V_n / 2 = 4,8 + 0,15 \cdot 4,8 / 2 = 5,16,$$

де  $n$  – витрати повітря. Для керамічних рекуператорів  $n=0,1 \div 0,2$ . Приймаємо  $n=0,15$ . Витрати диму перед рекуператором,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$V_d = m \cdot B \cdot V_d \cdot \rho = 0,8 \cdot 6,11 \cdot 1,63 = 7,97$$

де  $m$  – коефіцієнт втрат диму в печі та борові.  $m = 0,65 \div 0,85$ . Приймаємо  $m = 0,8$ ;

$\rho$  – коефіцієнт підсмоктування повітря.  $\rho=0,1 \div 0,15$ . Приймаємо  $\rho=0$ , бо в нашому випадку підсмоктування відсутнє.

Розрахункова кількість диму,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$V_d = V_d + n \cdot V_n / 2 = 7,97 + 0,15 \cdot 4,8 / 2 = 8,33.$$

Температура диму після рекуператору визначається за теплотмістом диму,  $\text{кДж/м}^3$ :

$$i_d'' = \frac{V_d i_d' \xi - V_n i_n''}{(V_d + n V_n) \xi} = \frac{7,97 \cdot 1460 \cdot 0,9 - 4,8 \cdot 710}{(7,97 + 0,15 \cdot 4,8) \cdot 0,9} = 900$$

де  $i_d'$  – теплотміст диму при  $t_d' = 950$  °С. Знаходимо за табл. 5.5.4  $i_d' = 1460 \text{ кДж/м}^3$ .

$i_n''$  – теплотміст підігрітого повітря. Знаходимо для  $t_n'' = 550$  °С за табл. 5.5.4  $i_n'' = 710 \text{ кДж/м}^3$ .

$\xi$  – коефіцієнт втрат тепла в рекуператорі.  $\xi=0,85 \div 0,95$ . Приймаємо  $\xi=0,9$ .

**Цьому значенню теплозмісту відповідає температура диму  $t_d'' = 590^\circ\text{C}$  (див. табл. 5.5.4).**

**Середньологарифмічний температурний напір,  $^\circ\text{C}$ :**

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{(t_d' - t_{\text{п}}'') - (t_d'' - t_{\text{п}}')}{\ln \frac{t_d' - t_{\text{п}}''}{t_d'' - t_{\text{п}}'}} = \frac{(950 - 550) - (590 - 20)}{\ln \frac{950 - 550}{590 - 20}} = 475^\circ.$$

Орієнтовне число керамічних блоків:

$$Z_{\text{ор}} = 1540 \cdot V_B^* = 1540 \cdot 5,19 = 7950.$$

Розділяємо блоки по ширині, висоті та довжині рекуператора таким чином, щоб  $z_1 = z_2$ , а  $z_3 = 2z_1$ . Тоді  $z_1 = 16$ ;  $z_2 = 16$ ;  $z_3 = 31$ .

Швидкість руху диму, м/с:

$$\omega_d = \frac{V_d n}{(z_1 - 1) z_2 f_3} = \frac{8,33 \cdot 2}{(16 - 1) \cdot 16 \cdot 0,027} = 2,5,$$

де  $n$  – число ходів в рекуператорі по диму. Для ефективної роботи рекуператора із врахуванням, що  $z_1 > 8$ , вибираємо  $n = 2$ ;

$f_d$  – площа перерізу блоку для проходження диму. За даними табл. 6.5.63

$$f_d = 0,0274 \text{ м}^2.$$

$$\omega_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}^* n}{z_1 z_3 f_{\text{п}}} = \frac{5,16}{16 \cdot 31 \cdot 0,013} = 0,8;$$

де  $f_{\text{п}}$  – площа перерізу блоку для проходження диму. За даними табл. 6.5.63  $f_{\text{п}} = 0,013 \text{ м}^2$ .

Коефіцієнт теплопередачі рекуператора:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d} + \frac{5}{\lambda} + \frac{0,8}{\alpha_{\text{п}}}},$$

де  $\alpha_d$  – коефіцієнт тепловіддачі від диму до стінки блоку. Визначається за рівнянням:  $\alpha_d = \alpha_d^K + \alpha_d^B$ , де  $\alpha_d^K$  – коефіцієнт тепловіддачі конвенцією:

$$\alpha_d^K = (3,51 + 0,000311 \cdot t_d) \cdot \frac{\omega_d^{0,8}}{d^{0,2}} = (3,51 + 0,000311 \cdot 770) \cdot \frac{2,5^{0,8}}{0,158^{0,2}} = 18,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}),$$

де  $t_d$  – середня температура диму,  $^\circ\text{C}$ :

$$t_d = 0,5(t_d' + t_d'') = 0,5(950 + 590) = 770,$$

$d$  – еквівалентний діаметр димових каналів у блоці рекуператора.

За даними табл. 6.5.63  $d = 0,158 \text{ м}$ .

Із урахуванням стану поверхні стінки приймаємо:

$$\alpha_d^K = 1,1 \cdot \alpha_d^K = 1,1 \cdot 18,6 = 20,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}).$$

$\alpha_d^B$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням. Визначається за мал. 6.5.57 для температури диму  $t_d = 770^\circ\text{C}$  та товщині газового шару

$$S = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,158 = 0,142 \text{ м}.$$

$$\alpha_d^B = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$$

Тоді:



$$\alpha_o = \alpha_o^K + \alpha_o^B = 20 + 8,7 = 28,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Середня температура повітря, °С:

$$t_{II} = 0,5 \cdot (t'_{II} + t''_{II}) = 0,5 \cdot (20 + 550) = 285^\circ \text{С}$$

Різниця температур стінки блоку та повітря, °С:

$$\Delta t = t_{CT} - t_{II} = 0,5 \cdot (t_o + t_{II}) - t_{II} = 0,5 \cdot (770 + 285) - 285 = 242^\circ \text{С}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від блоку до повітря,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ :

$$\alpha_{II} = (A \cdot \omega_{II}^{0,2} + 1) B \cdot \Delta t^{0,1} = (2,41 \cdot 0,8^{0,2} + 1) \cdot 1,02 \cdot 242^{0,1} = 5,8$$

де А, В- коефіцієнти, які залежать від середньої температури стінки

$$t_c = 0,5(t_{II} + t_o) = 0,5(285 + 770) = 527^\circ \text{С}.$$

За табл. 6.5.64 знаходимо А=2,41; В=1,02.

Із урахуванням стану поверхні стінки рекуператору:

$$\alpha_{II} = 1,1 \cdot \alpha_{II} = 1,1 \cdot 5,8 = 6,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

S- товщина стінки блоку рекуператора.

$$S = 0,02 \text{ м}.$$

$\lambda$ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки рекуператора (шамоту).

Визначається для середньої температури стінки за рівнянням:

$$\lambda = 0,7 + 0,00075 t_c = 0,7 + 0,00075 \cdot 527 = 1,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Тоді

$$K = \frac{1}{\frac{1}{28,7} + \frac{0,02}{1,2} + \frac{0,8}{6,5}} = 5,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Площа поверхні нагрівання рекуператору,  $\text{м}^2$ :

$$F = \frac{Q_{II}}{K \cdot \Delta t_{CEP}} = \frac{3,54 \cdot 10^6}{5,8 \cdot 475} = 1280,$$

де  $Q_{II}$ - витрати тепла на підігрівання повітря, Вт:

$$Q_{II} = V_B^X (i''_{II} - i'_{II}) = 5,16(710 - 25) \cdot 10^3 = 3,54 \cdot 10^6$$

Кількість блоків рекуператору:

$$Z = \frac{F}{f_{bl}} = \frac{1280}{0,161} = 7950$$

де  $f_{bl}$ - площа поверхні нагрівання одного блоку.

$$\text{За даними табл. 6.5.63 } f_{bl} = 0,161 \text{ м}^2.$$

Так як  $Z = Z_{op}$  то розрахунок виконано вірно. Якщо  $Z > Z_{op}$ , то треба зробити новий розрахунок, замінивши  $Z_{op}$  на  $Z$ .

## 7.8 Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 1.** Визначити час нагрівання заготовки із сталі 45 діаметром  $d = 25 \text{ мм}$  від температури  $t_{II} = 15^\circ \text{С}$  до температури  $t_K = 850^\circ \text{С}$ . Температура печі  $t_{Печ} = 1100^\circ \text{С}$ ,  $C_{п.м.} = 3,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

**Задача 2.** Визначити час нагрівання масивної заготовки за графіками при температурі печі  $t_{Печ} = 1250^\circ \text{С}$  та  $C_{п.м.} = 3,95 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ . Діаметр заготовки  $d = 30 \text{ мм}$ , сталь 15ХМ,  $t_{II} = 30^\circ \text{С}$ ,  $t_K = 1120^\circ \text{С}$ .

**Задача3.** Визначити час нагрівання масивної заготовки методом теплової діаграми. Марка сталі 20, товщина заготовки  $2S=0,6 \times 0,6\text{м}$ ,  $t_{\Pi}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t_K=1180^{\circ}\text{C}$ ,  $C_{\text{п.м.}}=4,02 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$ ,  $t_{\text{ПЕЧ}}=1300^{\circ}\text{C}$ .

**Задача4.** Визначити втрати тепла через кладку печі. Внутрішній шар – дінає товщиною  $\delta_o=300\text{мм}$ , зовнішній діатоміт товщиною  $\delta_{iz}=200\text{мм}$ . Розміри печі із арочним склепінням:  $B=2,1\text{м}$ ;  $L=2,5\text{м}$ ;  $H_{\text{СЕР}}=1,1\text{м}$ . Температури поверхонь:  $t'_{CT}=900^{\circ}\text{C}$ ,  $t''_{CT}=15^{\circ}\text{C}$ .

**Задача5.** Визначити втрати тепла випромінюванням через вікно завантаження із розмірами: ширина  $a=0,9\text{м}$ , висота  $b=0,5\text{м}$ , товщина кладки  $\delta=0,35\text{м}$ . Температура печі  $t_{\text{ПЕЧ}}=1200^{\circ}\text{C}$ , час вивантаження  $\tau=0,1\text{год}$ .

**Задача6.** Визначити номер пальника для спалювання доменного газу  $\left(Q_H^p = 4000 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}\right)$ . Повітря холодне. Витрати газу  $V=250 \text{ м}^3/\text{год}$ , кількість пальників  $n=4$ , ширина печі  $2,2\text{м}$ .

**Задача7.** Підібрати форсунку високого тиску для спалювання мазуту ( $B=0,2\text{кг/с}$ ) при надлишковому тиску мазуту  $400\text{кПа}$ . Тиск повітря перед форсуночною коробкою  $1\text{кПа}$ , температура повітря  $600^{\circ}\text{C}$ . Коефіцієнт витрат повітря  $1,2$ . Склад мазуту:  $C_p=86,2\%$ ;  $H^p=10,6\%$ ;  $S^p=0,5\%$ ;  $O^p=0,3\%$ ;  $N^p=0,6$ . Витрати повітря на розпилювання мазуту  $V_{\Pi}=1,25\text{кг/кг}$ .

**Задача8.** Визначити потрібну поверхню нагрівання та кількість труб в голчастому рекуператорі. Температура холодного повітря  $t'_{\Pi}=20^{\circ}\text{C}$ , температура підігрітого повітря  $t''_{\Pi}=300^{\circ}\text{C}$ , температура диму на вході до рекуператора  $t''_o=850^{\circ}\text{C}$ . Витрати диму  $V_o=0,645 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ , повітря  $V_{\Pi}=0,645 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ .

### Список літератури.

1. Краснокутський Г. Г., Колесник Ф. І., Теплотехнічні процеси і конструкції нагрівальних печей: Навч. Посібник / за ред. П. Г. Краснокутського. – К.: УСДО, 1995 – 248 с.
2. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высш. шк., 1980 – 469 с.
3. Metallургическая теплотехника: в 2 т. Теоретические основы. Учеб. для вузов/ В. А. Кривандин, В. А. Артюнов, В. С. Мاستрюков и др. – М.: Metallургия, 1960 – 424 с.
4. Теория, конструкция и расчет metallургических печей: Учеб. для техникумов: в 2 т. – Т. 2. Мастрюков В. С. Расчеты metallургических печей. – М.: Metallургия, 1986. – 376 с.
5. Теплотехнические расчеты metallургических печей: Учеб. пособие для студ. вузов/под ред. А. С. Телегина. – 2-е изд. – М.: Metallургия, 1982. – 360 с.
6. Казанцев Е. И. Промышленные печи. – М.: Metallургия, 1978. – 375 с.
7. Расчеты нагревательных печей./Под ред. Н. Ю. Тайц. – Киев: Теплотехника, 1969. – 540 с.

## **Зміст**

<b>1 Вступ. Основи технічної термодинаміки</b>	<b>4</b>
<b>2 Прикладна термодинаміка</b>	<b>25</b>
<b>3 Теплопередача.</b>	<b>41</b>
<b>4 Механіка пічних газів</b>	<b>60</b>
<b>5 Паливо та його горіння. Теплогенерація.</b>	<b>76</b>
<b>6 Матеріали та будівельні елементи печей</b>	<b>87</b>
<b>7 Конструкції та особливості роботи нагрівальних печей.</b>	
<b>Технологія нагрівання металів. Теплові розрахунки.</b>	<b>.93</b>
<b>Список літератури</b>	<b>.135</b>

**Посібник-довідник  
до лекційних курсів  
«Теплотехніка та теплоенергетика» і  
«Теоретичні основи теплотехніки»**

Укладачі:

Шоно Сергій Антонович  
Менафова Юлія Валентинівна

Редактор

Вз. /2000. Підп до друку  
Офсетний друк. Ум. друк. арк.  
Тираж прим.

Формат 60x90/16  
Обл.-вид. Арк.

---

ДДМА, 84313, Краматорськ, вул. Шкадінова, 72