



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування

Кафедра технології будівельних виробів
і матеріалознавства

03-09-47

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсової роботи з навчальної дисципліни
«Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
спеціалізації «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано
методичною комісією зі
спеціальності 192
«Будівництво та цивільна інженерія»
Протокол № 6 від 25.06.2019 р.



Методичні вказівки до курсової роботи з навчальної дисципліни «Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізації «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів» денної та заочної форм навчання / Бордюженко О. М. – НУВГП, 2019. – 39 с.

Укладач: Бордюженко О. М., к.т.н., доцент кафедри ТБВіМ.

Відповідальний за випуск: Дворкін Л. Й., д.т.н., проф., зав. кафедрою технології будівельних виробів і матеріалознавства.

Зміст

1. Загальні рекомендації, вихідні дані та зміст курсової роботи	3
2. Рекомендації до виконання окремих розділів курсової роботи	4
2.1. Опис роботи теплової установки.....	4
2.2. Технологічні параметри та режим роботи установки.....	4
2.3. Розрахунок горіння палива	5
2.4. Конструктивний розрахунок	12
2.5. Процес сушіння	16
2.6. Матеріальний баланс.....	19
2.7. Тепловий баланс	21
2.8. Аеродинамічний розрахунок	22
2.9. Техніко-економічні показники та загальні висновки.....	30
3. Додатки.....	31
4. Перелік рекомендованої літератури	39



1. Загальні рекомендації, вихідні дані та зміст курсової роботи

Курсова робота з дисципліни «Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання» – це один із видів індивідуальних завдань навчально-дослідницького та проектно-конструкторського характеру, який має за мету не лише поглиблення, узагальнення і закріплення знань студентів з навчальної дисципліни, а й застосування їх при вирішенні конкретного фахового завдання і вироблення вміння самостійно працювати з навчальною і науковою літературою, електронно-обчислювальною технікою, лабораторним обладнанням, використовуючи сучасні інформаційні засоби та технології. Курсова робота є окремим заліковим кредитом навчальної дисципліни і оцінюється як самостійний вид навчальної діяльності студента.

Дана курсова робота стосується технології виробництва в'язучого (повітряне або гідравлічне в'язуче) і представляє собою технологічний і теплотехнічний розрахунок установки для випалу або сушіння будівельного матеріалу.

Робота включає пояснювальну записку (до 25-30 сторінок) із схемами та ескізами теплової установки. Пропонується наступний склад роботи: вступ, опис теплової установки, вибір режимів роботи, технологічний розрахунок, розрахунок горіння палива, матеріально-теплові баланси, аеродинамічний розрахунок, техніко-економічні показники роботи теплової установки, список використаної літератури.

Робота оформляється у вигляді зброшурованого звіту на стандартних аркушах формату А4 рукописним способом або за допомогою друкарських пристроїв. Графічна частина має бути представлена аркушем формату А2, на якому зображується ескіз теплової установки, графіки температур теплоносія і виробів, діаграми (епюри) тиску газів.

Вихідні дані, що необхідні для виконання курсової роботи, вказуються в завданні, яке видається викладачем. Студентам також надається право вільного вибору теми роботи із запропонованого кафедрою переліку або пропонувати свої теми. В завданні на курсову роботу вказується тип теплової установки, продуктивність лінії виробництва будівельного матеріалу, сировина та її характеристика, а також вид палива, що використовується.

Робота повинна бути виконана у повній відповідності із завданням. На титульній сторінці необхідно вказати назву вищого навчального закладу, факультет, кафедру, тему курсової роботи, прізвище, ім'я та по батькові студента, посаду, прізвище та ініціали викладача, що перевіряє та приймає роботу.

Студент, який виконав роботу не за варіантом, а також не відповідно до зазначених вимог не допускається до її захисту.



Захист курсової роботи проводить комісія у складі двох-трьох викладачів кафедри, у тому числі керівника курсової роботи.

Якість виконання курсової роботи та результати її захисту оцінюються за шкалою оцінювання, що наведена в робочій програмі дисципліни.

Критерії оцінювання курсової роботи наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Орієнтовний розподіл балів за виконання курсової роботи

№	Вид контролю	Сума балів
1	Вчасність виконання розділів (відповідно плану) 4...5 етапів	30
2	Якість виконання роботи:	
2.1	Правильність, точність, повнота розрахунків, доцільність прийняття технологічних рішень, тощо	10
2.2	Оформлення пояснювальної записки	5
2.3	Оформлення графічної частини	10
2.4	Виконання в електр. вигляді	5
	Всього	30
3	Захист роботи	40
	Разом	100

2. Рекомендації до виконання окремих розділів курсової роботи

2.1. Опис роботи теплової установки

Включає в себе:

- опис конструкції установки, особливості її поєднання з іншими тепло-технічними агрегатами, тягодуттєвим, аспіраційним обладнанням;
- опис роботи установки (завантаження – вивантаження матеріалу, його рух в установці, способи та схеми спалювання палива, підведення теплоносія, аеро-(газо)динамічні схеми циркуляції газів.
- початкові і кінцеві параметри матеріалу, повітря, газів (температура, вологість, густина, тиск тощо).
- наводиться схема установки (опис проводиться згідно наведеної схеми).

2.2. Технологічні параметри та режим роботи установки

Необхідно описати фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час теплової обробки (ТО) даного матеріалу, з'ясувати режим роботи установки, швидкість підйому температури, тривалість її дії, розрахувати час перебування та швидкість руху матеріалу крізь установку, знімання продукції з одиниці об'єму (площі) установки.



З врахуванням необхідних коефіцієнтів визначити добову, годинну, річну продуктивність установки.

Продуктивність та знімання продукції є базовими для визначення розмірів теплового агрегату (в окремих випадках необхідно попередньо провести теплотехнічні розрахунки).

2.3. Розрахунок горіння палива

Короткі відомості про паливо.

Паливо за агрегатним станом поділяється на рідке, тверде і газоподібне.

Для всіх видів палива розрізняють горючу і негорючу частини.

Для твердого палива також розрізняють робочу, суху і горючу маси, для рідкого – робочу і суху.

Склад твердого і рідкого палива виражається вмістом в ньому окремих елементів і речовин в процентах.

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

де A^P – вміст золи в паливі; W^P – вміст вологи (індекс P означає, що наведений склад палива характеризує робочу масу).

Склад газоподібного палива виражається вмістом в ньому окремих газів в % від об'єму приведенного до 1 м^3 при нормальних або стандартних умовах.

Газоподібне паливо складається з горючих (CO , H_2 , CH_4 , C_mH_n) і негорючих газів (N_2 , O_2 , CO_2) і незначної кількості H_2O .

Однією з основних характеристик палива є його *теплота згорання*, тобто кількість теплоти, що виділяється при повному згоранні палива у нормальних умовах.

Розрізняють *вищу теплоту згорання* (якщо вологу в продуктах згорання враховувати у вигляді рідини) і *нижчу теплоту згорання* (якщо вологу враховувати як пару). Відповідні позначення: Q_v , Q_n , (Q_n^P , Q_n^G , ...).

Якщо відомий елементарний масовий склад (%) твердого і рідкого палива його теплота згорання визначається за формулами (кДж/кг):

$$\text{вища} - Q_v^P = 339 \cdot C^P + 1256 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S^P);$$

$$\text{нижча} - Q_n^P = 339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S^P) - 25 \cdot W^P.$$

Для газоподібного палива (природного газу, кДж/м³):

$$\text{вища} - Q_v = 398 \cdot \text{CH}_4 + 695 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 993 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1286 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1580 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 256 \cdot \text{H}_2\text{S};$$

$$\text{нижча} - Q_n = 358 \cdot \text{CH}_4 + 638 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 913 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1187 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1461 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 235 \cdot \text{H}_2\text{S}.$$

Для порівняння теплової цінності різних видів палива використовують поняття *умовного палива*.



УМОВНИМ вважається паливо нижча теплота згоряння якого складає:

$$Q_H = 29300 \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{) або } 7000 \text{ ккал/кг.}$$

Для перерахунку натурального палива в умовне визначають тепловий екві-

валент палива:
$$E = \frac{Q_H^P}{Q_{ум}} = \frac{Q_H^P}{29300} \cdot$$

Тоді витрати умовного палива: $V_{ум} = V \cdot E$,

де V – витрати натурального палива.

Розрізняють калоричну (калориметричну), теоретичну і дійсну *температуру горіння палива*.

Калорична температура t_k – це та температура, до якої нагрілися б продукти згоряння, якби вся теплота, що виділилась при їх утворенні пішла лише на їх нагрів.

Теоретична температура t_T – встановлюється з врахуванням поглинання теплоти, яка затрачена на дисоціацію H_2O і CO_2 . При температурах $t < 1800^\circ C$, ступінь дисоціації H_2O і CO_2 незначний, тому наближено можна приймати:

$$t_T \approx t_k.$$

Дійсна температура t_D – дійсна температура продуктів згоряння з врахуванням втрат тепла у топці або в печі.

Відношення t_D / t_T називається пірометричним коефіцієнтом:

$$\eta_{п} = \frac{t_D}{t_T} \cdot$$

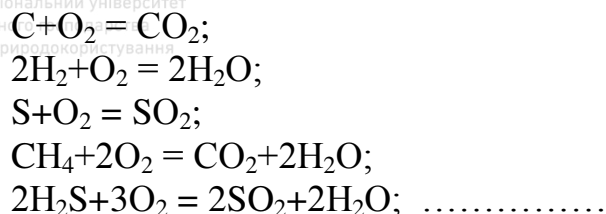
Розрахунки процесів горіння.

Мета розрахунку: Визначити кількість повітря, що необхідне для горіння; кількісний склад продуктів горіння; визначення дійсної температури горіння; встановлення значення коефіцієнту надлишку повітря, при якому забезпечується необхідна температура горіння або температура димових газів (для процесів сушіння, для гіпсоварильних котлів).

Розрахунок прийнято вести на робочу масу палива: 1 кг твердого або рідкого чи 1 м³ газоподібного. Можна також проводити розрахунок на 100 кг або 100 м³ палива.

В основу розрахунку покладені стехіометричні рівняння реакцій взаємодії горючих елементів палива або горючих газів з киснем. По витраті кисню на горіння знаходять витрати повітря. За даними реакцій горіння виводять для кожного елементу палива коефіцієнти, за допомогою яких можна провести розрахунок палива будь-якого складу та визначити питомі витрати кисню і вихід продуктів горіння.

Приклади реакцій:



Приклади розрахунків горіння палива.

Приклад 1. Розрахувати процес горіння вугілля такого умовного складу:
Кам'яне вугілля (вугільний пил) родовища.

Склад горючої маси (елементарний склад), %

$C^Г$	$H^Г$	$O^Г$	$N^Г$	$S^Г$	Сума
80,5	5,5	11,2	1,5	1,3	100,0

Спалювання проводиться у виносній топці.

Вміст золи $A^C = 24\%$; вміст води $W^P = 2\%$.

Початкова температура повітря: $t_{пов} = 20^\circ C$.

Початкова температура палива: $t_{пл} = 20^\circ C$.

Волговміст повітря: $d = 10$ г/кг сух.пов.

1. Визначаємо склад робочого палива.

Вміст золи в робочому паливі:

$$A^P = A^C \cdot \frac{100 - W^P}{100} = 24,0 \cdot \frac{100 - 2,0}{100} = 23,5 \%$$

Вміст інших елементів в робочому паливі:

$$C^P = C^Г \cdot \frac{100 - (A^P + W^P)}{100} = 80,5 \cdot \frac{100 - (23,5 + 2,0)}{100} = 60,0 \%$$

$$H^P = 5,5 \cdot \frac{100 - (23,5 + 2,0)}{100} = 4,1 \%$$
 і т.д. для інших елементів.

Результати розрахунків зводимо в таблицю:

Склад робочої маси палива, %

C^P	H^P	O^P	N^P	S^P	A^P	W^P	Сума
60,5	4,1	8,3	1,1	1,0	23,5	2,0	100,0

2. Визначаємо значення теплоти згорання робочого палива.

– вища теплота згорання:

$$\begin{aligned} Q_B^P &= 339 \cdot C^P + 1256 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S^P) = \\ &= 339 \cdot 60 + 1256 \cdot 4,1 - 109 \cdot (8,3 - 1,0) = 24694 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

– нижча теплота згорання:

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



$$w_o = 339 \cdot 60 + 1030 \cdot 4,1 - 109 \cdot (8,3 - 1,0) - 25 \cdot 2,0 = 23717 \text{ кДж/кг.}$$

3. Теоретично необхідна кількість повітря для горіння:

– сухе повітря:

$$L_o = 0,0889 \cdot C^P + 0,265 \cdot H^P - 0,0333 \cdot (O^P - S^P) = \\ = 0,0889 \cdot 60,0 + 0,265 \cdot 4,1 - 0,0333 \cdot (8,3 - 1,0) = 6,18 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

– вологе повітря (з врахуванням вологості атмосферного повітря):

$$L_o' = (1 + 0,0016 \cdot d) \cdot L_o = (1 + 0,0016 \cdot 10) \cdot 6,18 = 6,27 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

де d – вологовміст повітря (приймаємо 10 г/кг сух.пов.).

Горіння палива з теоретичною кількістю повітря є ідеальним випадком. На практиці при спалюванні палива в топках і печах необхідно давати дещо більшу кількість повітря через недосконалість процесу спалювання.

Відношення дійсної кількості повітря, що надходить на горіння, до теоретичної називається *коефіцієнтом надлишку повітря*:

$$\alpha = \frac{L_\alpha}{L_o}$$

Коефіцієнт α залежить від виду та способу спалювання і складає:

– для газоподібного палива.....	1,05...1,2
– для мазуту.....	1,15...1,25
– для твердого палива:	
пилеподібного	1,2...1,25
кускового.....	1,3...2,0

4. Дійсна кількість повітря для горіння.

Приймаємо коефіцієнт надлишку повітря для горіння $\alpha=1.2$.

Тоді витрати:

$$– \text{сухого повітря } L_\alpha = \alpha \cdot L_o = 1,2 \cdot 6,18 = 7,41 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$– \text{атмосферного повітря } L_\alpha' = \alpha \cdot L_o' = 1,2 \cdot 6,27 = 7,52 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

5. Склад і кількість продуктів згорання при $\alpha=1.2$:

$$V_{CO_2} = 0,01855 \cdot C^P = 0,01855 \cdot 60 = 1,113 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$V_{H_2O} = 0,112 \cdot H^P + 0,0124 \cdot W^P + 0,0016 \cdot d \cdot L_\alpha = 0,112 \cdot 4,1 + 0,0124 \cdot 2,0 + \\ 0,0016 \cdot 10 \cdot 7,41 = 0,603 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$V_{SO_2} = 0,007 \cdot S^P = 0,007 \cdot 1,0 = 0,007 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot L_\alpha + 0,008 \cdot N^P = 0,79 \cdot 7,41 + 0,008 \cdot 1,1 = 5,859 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_o = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 6,18 = 0,260 \text{ м}^3/\text{кг.}$$



Загальна кількість продуктів горіння при $\alpha=1.2$:

$$V_{\alpha} = 1,113+0,603+0,007+5,859+0,260 = 7,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

6. Складаємо матеріальний баланс процесу горіння на 100 кг вугілля, при $\alpha = 1,2$.

Матеріальний баланс процесу горіння

Прихідна частина	кг	Витратна частина	кг
Вугілля	100,0	Зола (шлак) A^P	23,5
Повітря:		Продукти згорання:	
$O_2 = 100 \cdot 7,41 \cdot 0,21 \cdot 1,429$	222,0	$CO_2 = 100 \cdot 1,113 \cdot 1,977$	220,0
$N_2 = 100 \cdot 7,41 \cdot 0,79 \cdot 1,251$	731,0	$SO_2 = 100 \cdot 0,007 \cdot 2,852$	2,0
$H_2O = 100 \cdot 0,0016 \cdot 10 \cdot 7,41 \cdot 0,804$	9,5	$H_2O = 100 \cdot 0,603 \cdot 0,804$	48,4
		$N_2 = 100 \cdot 5,859 \cdot 1,251$	732,0
		$O_2 = 100 \cdot 0,26 \cdot 1,429$	37,2
		Нев'язка	-0,6
Всього	1062,5	Всього	1062,5

Нев'язка балансу складає: $\frac{100 \cdot 0,6}{1062,5} = 0,057 \%$.

7. Визначимо калоричну (теоретичну) температуру горіння (t_T).

Для цього запишемо рівняння теплового балансу процесу горіння 1 кг палива:

$$Q_H^P + L'_{\alpha} \cdot c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} + c_{\text{пл}} \cdot t_{\text{пл}} = V_{\alpha} \cdot t_T \cdot c_{\text{д.г.}},$$

де $c_{\text{пов}}$ – теплоємність повітря, кДж/кг·°С (при $t_{\text{пов}}$ до 100°С – $c_{\text{пов}} \approx 1$ кДж/кг·°С).

Дійсні витрати атмосферного повітря по масі:

$$L'_{\alpha} = 7,52 \cdot \rho_{\text{пов}} = 7,52 \cdot 1,2 = 9,02 \text{ м}^3/\text{кг};$$

де $c_{\text{пл}}$ – теплоємність палива при температурі палива $t_{\text{пл}}$.

Для твердих видів палива можна приймати $c_{\text{пл}} = 1$ кДж/кг·°С;

для мазуту (при його підігріві до 80...100°С): $c_{\text{пл}} = 1,74 + 0,0025 \cdot t_{\text{пл}}$;

для природного газу: $c_{\text{пл}} = 1,55 \dots 1,7$ кДж/м³·°С.

Витрати димових газів за масою складуть (див. табл. матеріального балансу):



$$V_{\alpha} = 2,2 + 0,02 + 0,484 + 7,32 + 0,372 = 10,4 \text{ кг/кг};$$

де $c_{д.г.}$ – теплоємність димових газів при температурі газів $t_{д.г.}$ (t_T).

Для проектних розрахунків можна користуватись наближеними формулами:

– для твердих видів палива і мазуту – $c_{д.г.} = 1,05 + 0,0006 \cdot t_{д.г.}$ [кДж/кг·°C];

– для природного газу – $c_{д.г.} = 1,355 + 0,000075 \cdot t_{д.г.}$ [кДж/м³·°C];

Калоричну температуру можна визначити методом послідовного наближення (підбору) або шляхом розв'язку квадратного рівняння (якщо виразити $c_{д.г.}$ через t_T).

Якщо прийняти початкову температура палива та повітря рівною 20°C та підставивши решту відомих значень в рівняння теплового балансу процесу горіння, отримаємо:

$$23717 + 9,02 \cdot 1 \cdot 20 + 1 \cdot 20 = 10,4 \cdot t_T \cdot c_{д.г.}$$

Оскільки фактично $t_T = t_{д.г.}$, а $c_{д.г.}$ зв'язане залежністю із $t_{д.г.}$ (див. вище), то:

$$23717 + 9,02 \cdot 1 \cdot 20 + 1 \cdot 20 = 10,4 \cdot (1,05 \cdot t_T + 0,0006 \cdot t_T^2).$$

Таким чином, маємо квадратне рівняння, розв'язавши яке отримаємо:

$$t_T = 1269^{\circ}\text{C}.$$

8. Знайдемо дійсну температуру горіння з врахуванням величини пірометричного коефіцієнту $\eta_{п.}$

Для виносних топків $\eta_{п.} = 0,9$; для шахтних печей $\eta_{п.} = 0,67 \dots 0,73$; для обертючих печей $\eta_{п.} = 0,7 \dots 0,75$.

$$\text{Для даних умов при } \eta_{п.} = 0,9 \Rightarrow t_{д.} = \eta_{п.} \cdot t_T = 0,9 \cdot 1269 = 1142^{\circ}\text{C}.$$

В пічних установках в зоні випалу необхідно підтримувати значення температури горіння (а в сушильних установках – теплоносія), що відповідають технологічним умовам теплової обробки.

Тому задавшись необхідним значенням температури із рівняння теплового балансу можна визначити додаткову кількість повітря, що необхідно подати в зону горіння, або для розбавлення димових газів після топки.

Нехай при випалюванні вапна у шахтній печі температура в зоні випалу повинна становити 1050°C.

Запишемо рівняння теплового балансу процесу горіння:

$$Q_{н}^P + (L'_{\alpha} + X_{пов.}) \cdot c_{пов.} \cdot t_{пов.} + c_{пл.} \cdot t_{пл.} = V_{\alpha} \cdot t'_T \cdot c_{д.г.} + c'_{пов.} \cdot t'_{пов.} \cdot X_{пов.},$$

де t'_T – необхідна теоретична температура горіння:

$$t'_T = \frac{t'_{д.}}{\eta_{п.}} = \frac{1050}{0,7} = 1500^{\circ}\text{C}.$$

$c'_{пов.}$ – теплоємність повітря при $t'_{пов.} = 1500^{\circ}\text{C}$.



$X_{\text{пов}}$ – необхідна додаткова кількість повітря.

$$c_{\text{д.г.}} = 1,05 + 0,0006 \cdot 1500 = 1,95 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$\text{Тоді: } 23717 + 1 \cdot 20 + (9,02 + X_{\text{пов}}) \cdot 1 \cdot 20 = 10,4 \cdot 1500 \cdot 1,75 + 1,43 \cdot 1500 \cdot X_{\text{пов}}.$$

Звідси $X_{\text{пов}} = 1,62 \text{ кг/кг палива}$.

Тоді загальна кількість повітря, що витрачається на горіння:

$$L''_{\alpha} = L'_{\alpha} + X_{\text{пов}} = 9,02 + 1,62 = 10,64 \text{ кг/кг палива або } 8,86 \text{ м}^3/\text{кг палива}.$$

$$\text{Дійсний коефіцієнт витрати повітря: } \alpha_{\text{д}} = \frac{L''_{\alpha}}{L'_0} = \frac{8,86}{6,27} = 1,41.$$

Визначимо загальну кількість продуктів горіння при новому $\alpha_{\text{д}} = 1,41$.

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01855 \cdot C^{\text{P}} = 0,01855 \cdot 60 = 1,113 \text{ м}^3/\text{кг.} \text{ – без змін.}$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S^{\text{P}} = 0,007 \cdot 1,0 = 0,007 \text{ м}^3/\text{кг.} \text{ – без змін.}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,112 \cdot \text{H}^{\text{P}} + 0,0124 \cdot \text{W}^{\text{P}} + 0,0016 \cdot d \cdot L''_{\alpha} = 0,626 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L''_{\alpha} + 0,008 \cdot \text{N}^{\text{P}} = 7,01 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha_{\text{д}} - 1) \cdot L_0 = 0,21 \cdot (1,41 - 1) \cdot 6,18 = 0,532 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Загальна кількість продуктів горіння при $\alpha_{\text{д}} = 1,41$:

$$V'_{\alpha} = 1,113 + 0,626 + 0,007 + 7,01 + 0,532 = 9,29 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Якщо димові гази призначені для використання їх в якості теплоносія в сушарці, то необхідно додатково визначити їх вологовміст та ентальпію.

Вологовміст димових газів:

$$d_{\text{д.г.}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 1000}{G_{\text{д.г.}}}, \text{ [г/кг сух.газів.],}$$

де $G_{\text{H}_2\text{O}}$ – маса водяних парів в димових газах, віднесена до 1 кг палива;

$G_{\text{д.г.}}$ – маса сухих димових газів, від спалювання 1 кг палива.

$$d_{\text{д.г.}} = \frac{0,626 \cdot 0,804 \cdot 1000}{2,2 + 7,01 \cdot 1,251 + 0,532 \cdot 1,429 + 0,02} = 43 \text{ г/кг сух.газів.}$$

Ентальпію продуктів горіння, віднесену до 1 кг сух.газів можна визначити за формулою:

$$I_{\text{д.г.}} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}} + L''_{\alpha} \cdot c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} + c_{\text{пл}} \cdot t_{\text{пл}}}{G_{\text{д.г.}}} = \frac{23717 + 10,64 \cdot 1 \cdot 20 + 1 \cdot 20}{11,75} = 2038 \text{ кДж/кг.}$$



Сушарки.

Об'єм барабанної сушарки:

$$V_6 = \frac{W}{m_0} \text{ [м}^3\text{]},$$

де W – кількість вологи, що випаровується за год., кг; m_0 – об'ємне напруження барабану за вологою, кг/м³·год.

Кількість вологи можна знайти знаючи початкову і кінцеву вологість матеріалу а також продуктивність установки по кінцевому продукту:

$$W = \Pi \cdot \frac{W_1 - W_2}{100 - W_1} \text{ [кг/год]}.$$

$$m_0 = 2\rho_n \cdot \beta \cdot \frac{W_1 - W_2}{200 - (W_1 - W_2)},$$

де ρ_n – насипна густина матеріалу в перерахунку на середню вологу; β – коефіцієнт заповнення барабану матеріалом (0.15...0.2).

Можна також задаватись m_0 в залежності від характеристик матеріалу, що підлягає ТО, та початкової і кінцевої температури газів:

Таблиця 1. Основні параметри сушіння матеріалів в сушильних барабанах

Назва матеріалу	Насипна густина, кг/м ³	Вологість, %		Температури газів, °С		Напруження m_0 , кг/м ³ ·год	Рекомендований тип насадок
		w_n	w_k	t_n	t_k		
Глина	1800	20...25	4...6	600...800	80...100	50...60	Лопатева
–//–	1800	20...25	0,5...1	750...850	100...110	40	Стільникова
Глина вогнетривка	–	8...10	0,5...1	800...1000	70...80	60	Лопатева
Тирса	250	30...40	10...15	300...400	80...100	20...30	Лопатева
Вапняк	2000	10...12	0,5...1	800...1000	100...120	40...65	Лопатева або стільникова
Каолін	1500	20...30	0,5...2	800...1000	60...100	30...45	Лопатева
Пісок	1500	5...10	0,1...0,3	800...1000	80...100	80...100	Стільникова
Сланець	–	25...30	5...10	500...600	80...100	40...65	Лопатева
Торф	300	40...50	15...20	400...450	80...100	70...80	Лопатева
Буре вугілля	–	30	10...15	400...500	60...150	60...100	Лопатева
Шлак гранульований	–	20	0,3	500...600	80...100	25...50	Стільникова

Найчастіше відношення $L_6/D_6 = 5...7 = k$.



$$\text{Оскільки } V_6 = \frac{\pi D_6^2}{4} \cdot L_6 = 0,785 \cdot k \cdot D_6^3; \quad \text{то } D_6 = \sqrt[3]{\frac{V_6}{0,785 \cdot k}}.$$

Мінімально допустимий внутрішній діаметр барабану можна також визначити по величині допустимої швидкості відхідних газів з барабану:

$$v_{\text{газ}} = \frac{4V_{\text{газ}}}{3600 \cdot \pi \cdot D_6^2 \cdot (1 - \beta)},$$

де $v_{\text{газ}}$ – швидкість газів в м/с; $V_{\text{газ}}$ – об'ємна витрата газів в м³/год; β – коефіцієнт заповнення барабану.

При значеннях $v_{\text{газ}} = 2,5$ м/с та $\beta = 0,2$ одержимо:

$$D_6 = 0,0133 \cdot \sqrt{V_{\text{газ}}}.$$

Необхідно враховувати, що розміри сушильного барабану зазвичай приймають по каталогам заводів-виробників за даними, виходячи з необхідного внутрішнього об'єму барабану. При цьому діаметр барабану спочатку приймають наближено, і після теплового розрахунку визначають його необхідні розміри за вищенаведеними формулами або проводиться перевірка швидкості газів на виході.

Тривалість перебування матеріалу в барабані або тривалість сушіння можна визначити:

$$\tau = \frac{V_6 \cdot \beta \cdot \rho_n}{P_{\text{ср}}} \text{ [ГОД]},$$

де ρ_n – насипна густина матеріалу при середній вологості, кг/м³; $P_{\text{ср}}$ – середня продуктивність барабану:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P}{2} \cdot \left(\frac{100}{100 - W_1} + \frac{100}{100 - W_2} \right).$$

Виразивши об'єм барабану через формулу $V_6 = \frac{W}{m_0}$:

$$\tau = \frac{2 \cdot \beta \cdot \rho_n}{m_0} \cdot \frac{W_1 - W_2}{200 - (W_1 - W_2)}.$$

Обертові печі.

Розрахунок проводиться після складання теплового балансу для окремих зон обертової печі.

Теплова потужність печі:

$$\Phi = P \cdot Q_{\text{пит}} \text{ [МВт]}.$$

де P – продуктивність установки, кг/с;



$Q_{\text{пит}}$ – питомі витрати тепла на 1 кг продукту, МДж.

$$Q_{\text{пит}} = V_{\text{пал}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{p}},$$

де $V_{\text{пал}}$ – витрати палива; $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ – нижча теплота згоряння палива.

Внутрішній діаметр печі можна визначити за такою емпіричною формулою:

$$D_{\text{вн}} = \sqrt[3]{\frac{\Phi}{1,28}} \text{ [м]},$$

Загальний діаметр печі враховує товщину футеровки:

$$D = D_{\text{вн}} + 2 \cdot \delta_{\text{ф}},$$

де $\delta_{\text{ф}}$ – товщина футеровки.

Довжину зон можна визначити із формули теплообміну для даної зони:

$$L = \frac{\Pi \cdot Q}{3,6 \cdot \alpha \cdot S \cdot \Delta t},$$

де Π – продуктивність установки, кг/год; Q – кількість тепла, що повинно бути передане матеріалу в даній зоні (кДж/кг); α – приведений коефіцієнт тепловіддачі від газового потоку до матеріалу в даній зоні, Вт/м²·°C; S – загальна площа футеровки (внутрішньої поверхні) та теплообмінних пристроїв на 1 м довжини зони, м²/м ($S = \pi \cdot D_{\text{вн}}$, якщо не враховувати теплообмінні пристрої); Δt – середньологарифмічна різниця температур газів і матеріалу в зоні, °C:

$$\Delta t = \frac{(t_{\text{г}} - t_{\text{м}}) - (t'_{\text{г}} - t'_{\text{м}})}{\ln \frac{t_{\text{г}} - t_{\text{м}}}{t'_{\text{г}} - t'_{\text{м}}}},$$

де $t_{\text{г}}$ і $t'_{\text{г}}$ – температура газів на початку і в кінці зони; $t_{\text{м}}$ і $t'_{\text{м}}$ – температура матеріалу на початку і в кінці зони.

Швидкість руху матеріалу по печі можна знайти за формулами:

$$v_{\text{м}} = 1,88 \cdot D_{\text{вн}} \cdot \frac{i \cdot n}{\sin \beta} \text{ [м/год]},$$

де i – нахил корпусу печі, % (в середньому 3...5%); n – швидкість обертання, об/хв (в середньому 0,5...4,0); β – кут природного відкосу матеріалу, град.

$$\text{Або } v_{\text{м}} = \frac{\Pi}{15 \cdot \pi \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot \varphi \cdot \rho_{\text{н}}},$$

де φ – коефіцієнт заповнення печі (0,08...0,1); $\rho_{\text{н}}$ – насипна густина матеріалу, кг/м³; Π – продуктивність, кг/год.

Загальна довжина печі складається із суми довжин всіх зон:

$$L_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n L_i.$$

Час перебування матеріалу в зоні або печі:



$$\tau_i = \frac{L_i}{v_M}; \tau_{\text{заг}} = \frac{L_{\text{заг}}}{v_M}.$$

Питомий зйом продукції:

$$\text{– з 1 м}^2 \text{ перерізу печі: } P_3 = \frac{\Pi}{\pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot L} \quad [\text{кг/м}^2 \cdot \text{год}];$$

$$\text{– з 1 м}^3 \text{ об'єму печі: } P'_3 = \frac{4\Pi}{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot L} \quad [\text{кг/м}^3 \cdot \text{год}]$$

Шахтні печі.

Час знаходження матеріалу в печі:

$$\tau = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{виш}} + \tau_{\text{ох}}, \quad [\text{год}].$$

де $\tau_{\text{н}}$, $\tau_{\text{виш}}$, $\tau_{\text{ох}}$ – відповідно тривалість нагріву, випалювання та охолодження матеріалу (розраховують з рівнянь кількості теплоти, що необхідно надати матеріалу в кожній із зон).

Корисний об'єм шахти, м³:

$$V_{\text{ш}} = \frac{\Pi \cdot \tau}{24 \cdot \rho_{\text{н}}},$$

де Π – продуктивність установки, кг продукту/добу; τ – час перебування матеріалу в печі, год; $\rho_{\text{н}}$ – насипна густина матеріалу, кг/м³.

Відношення висоти шахти до середнього діаметру в середньому складає:

$$\frac{H_{\text{ср}}}{D_{\text{ср}}} = 2,5 \dots 4 = k.$$

$$\text{Тоді } V_{\text{ш}} = \frac{\Pi \cdot D_{\text{ср}}^2}{4} \cdot H; \quad \text{або } D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{ш}}}{\pi \cdot k}}.$$

Висота шахти: $H = h_{\text{н}} + h_{\text{виш}} + h_{\text{ох}}$.

де $h_{\text{н}}$, $h_{\text{виш}}$, $h_{\text{ох}}$ – відповідно висота зон нагріву, випалювання та охолодження.

Можна приймати співвідношення висот зон: $H = 25 + 50 + 25\%$.

Сушіння з використанням в якості теплоносія димових газів

В більшості промислових установок для сушіння матеріалів та виробів, до яких не висуваються підвищені вимоги по чистоті поверхні, в якості сушильного агента використовують димові гази (продукти горіння палива) розбавлені повітрям.

Процес сушіння димовими газами зображується на I-d діаграмі аналогічно процесу сушіння повітрям. Відмінність полягає в тому, що замість процесу підігріву зовнішнього повітря, тут передбачене його змішування з димовими газами при розбавленні їх до необхідної початкової температури.

Розглянемо цей варіант сушіння на прикладі.

Приклад

Розрахунок процесу сушіння з використанням в якості теплоносія димових газів (високотемпературний процес)

Визначити питомі витрати теплоти і теплоносія на 1 кг випаруваної вологи для дійсного процесу сушки з однократним використанням теплоносія – суміші повітря і димових газів від спалювання природного газу.

Вихідні дані:

- параметри повітря: $t_o = 10^\circ\text{C}$, $\varphi_o = 60\%$;
- параметри димових газів: $d_r = 101$ г/кг; $I_r = 1180$ кДж/кг;
- параметри теплоносія: початкова $t_n = 600^\circ\text{C}$ (початкова температура сушіння), кінцева $t_k = 110^\circ\text{C}$ (на виході із сушарки);
- початкова та кінцева температура матеріалу: $t_{m1} = 15^\circ\text{C}$; $t_{m2} = 80^\circ\text{C}$. Втрати тепла в навколишнє середовище та на нагрів матеріалу: $q = 800$ кДж/кг вологи.

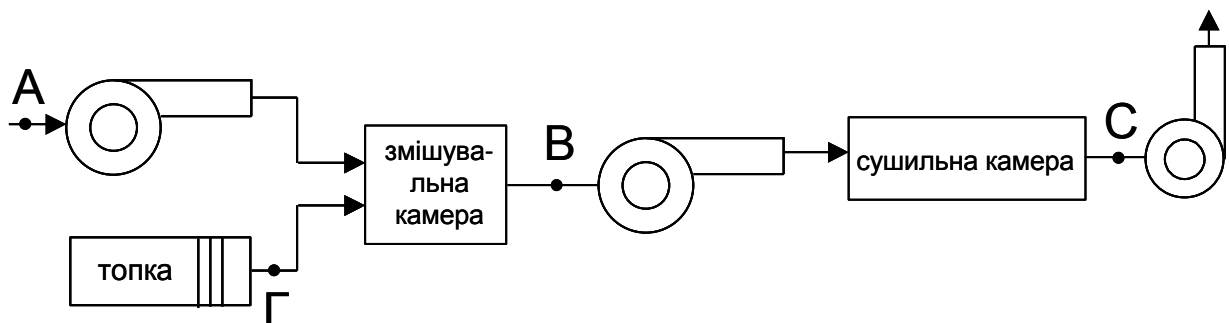


Рис. 1. Схема сушильного процесу

Як правило, для розрахунку процесу сушіння використовують дві I-d діаграми: високо- і низькотемпературну, оскільки використання лише високотемпературної у зв'язку з її малим масштабом знижує точність розрахунків.

Будуємо процес в I-d діаграмі:



Згідно вихідних даних знаходимо положення т. А і Г, що відповідають параметрам стану повітря і димових газів.

Далі з'єднуємо їх прямою лінією АГ, яка відображає процес змішування димових газів з повітрям. На перетині лінії АГ з ізотермою $t_n=600^\circ\text{C}$ знаходимо т.В, яка характеризує параметри теплоносія, що надходить в сушарку.

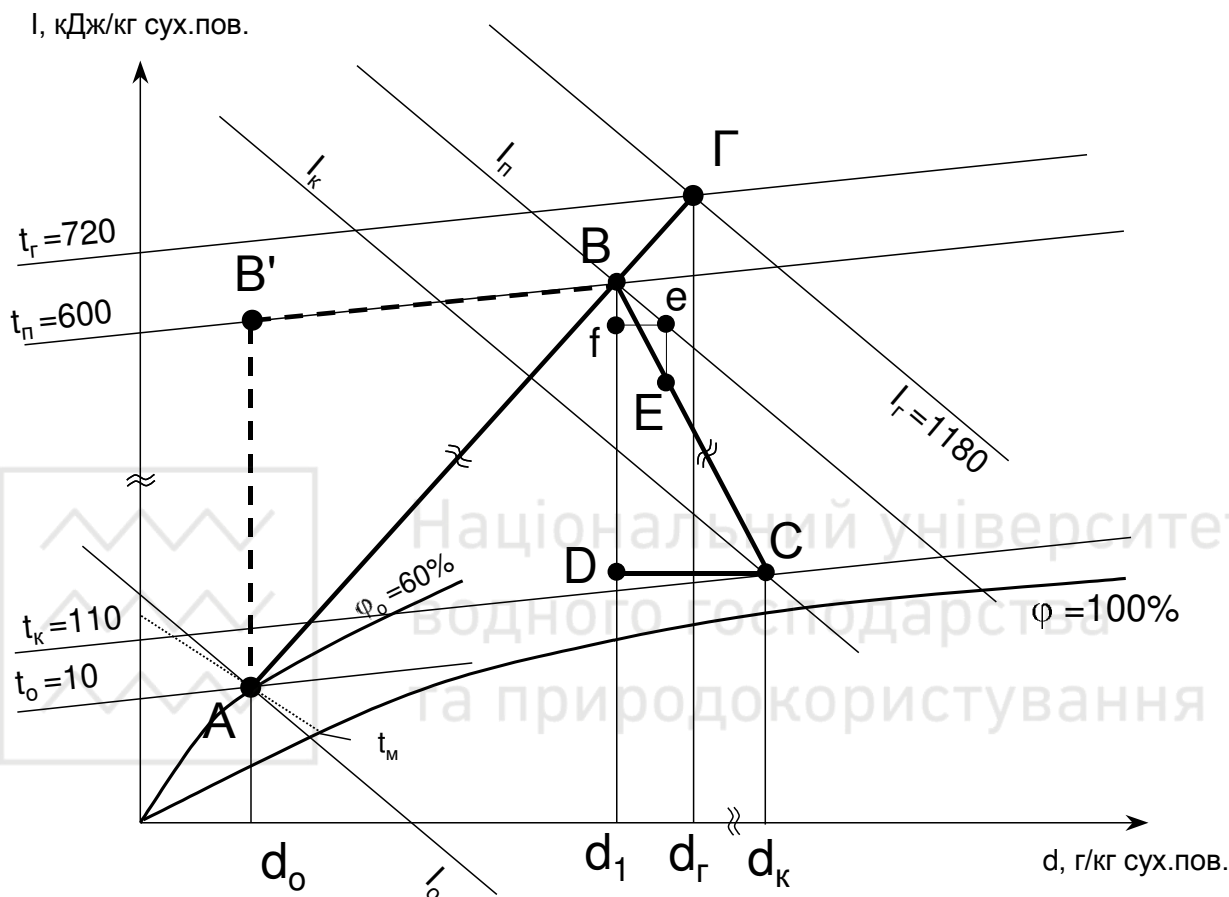


Рис. 2. Побудова сушильного процесу в I-d діаграмі

Визначимо кратність змішування, або кількість повітря, що необхідно додати до 1 кг сухих димових газів щоб знизити їх температуру від t_r до t_n .

$$n = \frac{l_n}{l_r} = \frac{d_r - d_1}{d_1 - d_0} = \frac{BG}{AB},$$

де BG, AB – довжини відрізків (мм) в масштабі реальної I-d діаграми.

$$\text{Тоді } n = \frac{27}{107} = 0.25 \frac{\text{кг пов.}}{\text{кг сух. газів}}.$$

Через т.В проводимо дві лінії – адіабату теоретичного процесу і вертикальну лінію, що збігається з $d_1 = \text{const}$.

Знаходження політропної лінії дійсного процесу BC, знаходимо за методикою, розглянутою в пр.1.



Для визначення лінії дійсного процесу сушки ВС, необхідно знайти наскільки ентальпія відпрацьованого теплоносія буде відрізнятись від початкової ентальпії:

$$\Delta = q_{д.т.} + q_{вл.} - q_m - q_{н.с.},$$

де $q_{д.т.}$ – додаткове тепло, що підводиться в сушарці;

$q_{вл.}$ – тепло, що надійшло з вологою матеріалу;

$(q_m + q_{н.с.})$ – задана величина. (тепло на нагрів матеріалу та втрати тепла в навколишнє середовище)

$$\Delta = 0 + 4,19 \cdot 15 - 800 \approx -737 \text{ кДж/кг вологи.}$$

Отже лінія дійсного процесу пройде нижче адіабати теоретичного процесу. Встановимо напрямок лінії дійсного процесу. Для цього позначимо довільно т.е на адіабаті, що проходить через т. В. Проведемо паралельно осі d відрізок e–f. Далі знаходимо відрізок eE, що характеризує відхилення політропи:

$$eE = \frac{\Delta \cdot ef}{m} = \frac{-737 \cdot 25}{2132} = -9 \text{ мм},$$

де $m = \frac{M_i}{M_d} \cdot 1000$ – приведений масштаб I-d діаграми. (якщо $M_i=7,1$ кДж/(кг·мм) а $M_d=3,33$ г/(кг·мм)

Через т.В і т.Е проводимо лінію до перетину з лінією $t_k = 110^\circ\text{C}$ (кінцевою температурою теплоносія) і знаходимо кінцеву точку процесу (т.С):

$$т.С : t_k=110^\circ\text{C}, d_k= 246 \text{ г/кг сух.пов.}, I_k=795 \text{ кДж/кг сух.пов.}$$

Із т.С проводимо перпендикуляр до вертикальної лінії, що проходить через т.В ($d_1 = const$) – одержимо відрізок CD.

Тоді витрати сухої газоповітряної суміші:

$$l_{см} = \frac{1000}{DC \cdot M_d} = \frac{1000}{49 \cdot 3.33} = 6.1 \frac{\text{кг}}{\text{кг вол.}}$$

де M_d – масштаб I-d діаграми по d.

Витрати робочої газоповітряної суміші:

$$l'_{см} = l_{см} (1+0,001 \cdot d_1) = 6.1 \cdot (1+0.001 \cdot 82) = 6.6 \text{ кг/кг вол.}$$

Витрати сухих димових газів (т. Г):

$$l_{Г} = \frac{l_{см}}{1+n} = \frac{6.1}{1+0.25} = 4.88 \frac{\text{кг}}{\text{кг вол.}}$$

Витрати робочих димових газів:

$$l'_{Г} = l_{Г} (1+0,001 \cdot d_{Г}) = 4.88 \cdot (1+0.001 \cdot 101) = 5.4 \text{ кг/кг вол.}$$

Витрати сухого атмосферного повітря:



$$l_{\text{п}} = l_{\text{см}} - l_{\text{г}} = 6.1 - 4.88 = 1.22 \text{ кг/кг вол. (або } l_{\text{п}} = n \cdot l_{\text{г}} = 0.25 \cdot 4.88 = 1.22 \text{ кг/кг}$$

вол.

Витрати вологого атмосферного повітря:

$$l'_{\text{п}} = l_{\text{п}}(1 + 0.001 \cdot d_0) = 1.22 \cdot (1 + 0.001 \cdot 6) = 1.23 \text{ кг/кг вол.}$$

Витрати вологого відпрацьованого теплоносія:

$$l_{\text{від}} = l_{\text{см}}(1 + 0.001 \cdot d_{\text{к}}) = 6.1 \cdot (1 + 0.001 \cdot 246) = 7.6 \text{ кг/кг вол.}$$

Останні знайдені витрати необхідні для підбору тяго-дутьового обладнання.

При змішуванні димових газів з атмосферним повітрям теплота затрачається фактично лише на підігрів повітря. Тому знайдемо т. В', яка характеризує повітря, нагріте від початкової температури t_0 до $t_{\text{п}}$ газоповітряної суміші на вході в сушарку.

Точка В та т. В' відрізняються на величину ентальпії водяних парів в продуктах згорання.

З т.А підніmemo вертикальну лінію (при $d_0 = const$) до перетину з $t_{\text{п}} = 600^{\circ}\text{C}$. Отримаємо В'.

Тоді витрати тепла на сушіння газоповітряною сумішшю:

$$q = \frac{AB'}{CD} \cdot m, \quad q = \frac{AB'}{CD} \cdot m = \frac{87}{49} \cdot 2132 = 3785 \frac{\text{кДж}}{\text{кг вол.}}$$

2.6. Матеріальний баланс

Матеріальний баланс будь-якого теплового процесу виражає закон збереження маси матеріалів і речовин, що приймають участь у ньому.

$$\sum G_{\text{мат}} = \sum G_{\text{прод}} + \sum G_{\text{від}} + \sum G_{\text{в.г.}},$$

де $\sum G_{\text{мат}}$ – сумарна маса матеріалів (твердих, рідких, газоподібних), що надходять в теплову установку; $\sum G_{\text{прод}}$ – маса вихідного готового продукту (висушеного чи випаленого); $\sum G_{\text{від}}$ – маса відходів процесу (в твердому і рідкому стані); $\sum G_{\text{в.г.}}$ – маса відхідних газів (димових і технологічних).

Матеріальні баланси складають на певну базу. База балансу – це відрізок часу або маса продукції на який (яку) складають баланс. Найчастіше баланси складають на 1 год., або на 1 кг готового продукту.

Прихідні частини балансу:

1) Витрати сировини: $G_{\text{с}}$.

Встановлюються з врахуванням вологості, втрат з виносом матеріалу, зольності палива і т.ін.

2) Витрати палива: $G_{\text{пал}}$ – найчастіше невідомо величина балансу.



3) Витрати повітря: $G_{\text{пов}}$ або витрати димових газів $G_{\text{д.г.}}$.

Для сушильних процесів замість п. 2) і 3) – витрати димових газів $G_{\text{д.г.}}$.

Витратні частини балансу:

1) Вихід продукту: $G_{\text{пр}}$.

$G_{\text{пр}} = 1$ кг при складанні балансу на одиницю маси.

2) Вихід вологи сировини: $G_{\text{вл}}$.

3) Вихід технологічних газів і парів в результаті хімічних перетворень: $G_{\text{т.г.}}$.

4) Пиловинос (зола і залишки сировини): $G_{\text{вин}}$.

5) Вихід продуктів згорання палива: $G'_{\text{д.г.}}$.

Найчастіше витрати палива або сушильного агента до складання теплового балансу є невідомою величиною, тому спочатку наводиться попередній варіант матеріального балансу з невідомою величиною $G_{\text{пал}}$ або $G_{\text{д.г.}}$:

Попередній матеріальний баланс установки на 1 кг продукту (на 1 год.)

Прихідна частина	кг	Витратна частина	кг
1.		1.	
2.		2.	
...		...	
п.	$G_{\text{пал}}$	м.	

Оскільки для встановлення значень деяких із статей балансу необхідно знати величину $G_{\text{пал}}$, то в правих колонках обох частин балансу можуть стояти вирази пов'язані з $G_{\text{пал}}$ замість фактичних значень маси.

Після того, як буде встановлено значення $G_{\text{пал}}$ (за допомогою теплового балансу) проводиться перерахунок матеріального балансу на фактичні значення.

Матеріальний баланс установки на 1 кг продукту (на 1 год.)

Прихідна частина	кг	%	Витратна частина	кг	%
1.			1.		
2.			2.		
...			...		
п.			м.		
Всього	$\sum_{i=1}^n G_{\text{прих}}$	100	Всього	$\sum_{i=1}^m G_{\text{витр}}$	100

Тепловий баланс (за аналогією з матеріальним) виражає закон збереження енергії (теплової енергії) процесу. Характеризує рівновагу введеної теплоти в процес і її витрати в ньому.

Складається також на 1 кг продукту або 1 год. роботи установки.

Розв'язок рівняння теплового балансу дозволяє знайти невідому величину – найчастіше, питому кількість тепла на теплову обробку, а по ній – витрати палива чи сушильного агента.

Складаючи теплові баланси для окремих зон установок, можна знайти температури на границях зон, а по ним – побудувати криві ТО.

Рівняння теплового балансу в загальному вигляді записується наступним чином:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф.пл.}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{екз.}} + Q_{\text{огор}} =$$

$$Q_{\text{м}}' + Q_{\text{енд.}} + Q_{\text{д.г.}} + Q_{\text{вип}} + Q_{\text{н.с.}} + Q_{\text{огор}}' + Q_{\text{втр.х.ф.}} + Q_{\text{вин.}}'$$

де $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – нижча теплота згорання робочої маси палива; $Q_{\text{ф.пл.}}$ – фізична теплота палива; $Q_{\text{м}}$ – фізична теплота матеріалу (сировини); $Q_{\text{пов}}$ – фізична теплота повітря, що надходить на горіння; $Q_{\text{екз.}}$ – теплота від екзотермічних реакцій; $Q_{\text{огор}}$ – теплота огороджувальних конструкцій;

$Q_{\text{м}}'$ – теплота на нагрів матеріалу; $Q_{\text{енд.}}$ – теплота на ендотермічні реакції (наприклад, дегідратації і декарбонізації); $Q_{\text{д.г.}}$ – теплота димових газів (продуктів горіння); $Q_{\text{вип}}$ – теплота на випаровування фізичної вологи з матеріалу; $Q_{\text{н.с.}}$ – втрати тепла в навколишнє середовище; $Q_{\text{огор}}'$ – теплота на нагрів огороджувальних конструкцій; $Q_{\text{втр.х.ф.}}$ – втрати тепла з фізичним і хімічним недопалом палива; $Q_{\text{вин.}}$ – втрати тепла через пиловинос та відкриті отвори установки.

Зважаючи на деякі особливості в теплотехнічному розрахунку окремих установок, в кожному конкретному випадку рівняння теплового балансу буде приймати певний відповідний вигляд.

Форма таблиці зведеного теплового балансу теплової установки наведено нижче.

Нев'язка балансу (різниця між сумами прихідних і витратних частин), яка може бути зі знаком плюс або мінус, не повинна перевищувати 0,1%.



Тепловий баланс установки (зони) (кДж/кг продукту або кДж/год.)

Прихідна частина	кДж	%	Витратна частина	кДж	%
1.			1.		
2.			2.		
...			...		
n.			m.		
Всього	$\sum_{i=1}^n Q_{\text{прих}}$	100	Всього	$\sum_{i=1}^m Q_{\text{витр}}$	100

2.8. Аеродинамічний розрахунок

Аеродинамічний розрахунок теплової установки проводиться з метою визначення опорів на шляху руху газів, повітря, продуктів горіння, що необхідно для підбору тяго-дугтєвого і аспіраційного обладнання.

Загальні положення.

Рух газів може бути природним і примусовим. В теплових установках *природний* рух газів обумовлений геометричним тиском (напором), що створюється головним чином димовою трубою.

Геометричний напір P_{Γ} характеризує собою різницю тисків в тепловій установці та на висоті, на якій йде викид відпрацьованого теплоносія, Н/м^2 :

$$P_{\Gamma} = H \cdot g \cdot (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\Gamma}),$$

де H – висота газового стовпа (фактично висота димової труби), м;

$\rho_{\text{пов}}$, ρ_{Γ} – відповідно густина повітря і газів, кг/м^3 .

Дійсні густина, швидкість та об'єм газів залежать від температури:

$$\rho_t = \rho_o \cdot \frac{1}{1 + \frac{t}{273}}; \quad v_t = v_o \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right); \quad V_t = V_o \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right),$$

де ρ_o , v_o , V_o – густина, швидкість та об'єм газів при нормальних умовах (0°C ; 101325 Па).

Примусово гази рухаються під дією повного тиску (суми статичного і динамічного), що створюється компресорами, вентиляторами і т.д.

Статичний тиск виражає собою різницю між повним тиском всередині замкнутого об'єму і атмосферним тиском зовні:

$$P_c = P - P_{\text{ат}}.$$

Найчастіше в теплових установках $P = P_{\text{ат}}$, або $P < P_{\text{ат}}$ (незначне розрідження) для запобігання викиду газів крізь нещільності установок.

Динамічний тиск виражає кінетичну енергію рухомого потоку газів, Н/м^2 :



$$P_d = \frac{\rho_0 v_0^2}{2} \rho_t = \frac{\rho_0 v_0^2}{2} \left(1 + \frac{t}{273}\right).$$

При русі реальних газів існують втрати тиску ($P_{втр}$) на подолання опорів. Тому згідно рівняння Бернуллі:

$$P_r + P_c + P_d + P_{втр} = const.$$

При переміщенні газів існують *лінійні втрати тиску* або втрати тиску на тертя і *місцеві втрати тиску* (виникають внаслідок зміни характеру, швидкості і напрямку руху).

Лінійні втрати тиску, Па (Н/м^2):

$$\Delta P_{тр} = \lambda \frac{l}{d_e} \cdot \frac{\rho_0 v_0^2}{2} \left(1 + \frac{t}{273}\right),$$

де l – довжина ділянки, м; d_e – еквівалентний (гідрравлічний або приведений) діаметр трубопроводу, м:

$$d_e = \frac{4 \cdot S}{\Pi},$$

де S – площа поперечного перерізу, м^2 ; Π – периметр, м.

У відповідності з наведеною вище формулою, для трубопроводів круглого перерізу – $d_e = d$.

λ – коефіцієнт тертя по довжині каналу (залежить від шорсткості труб та характеру руху газів).

Характер руху газів визначає критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d_e \cdot \rho}{\eta_t} = \frac{v \cdot d_e}{\nu_t},$$

де η_t – динамічна в'язкість, Па·с; ν_t – кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$.

При ламінарному русі ($Re < 2200$):

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

При турбулентному русі:

$$\lambda = 0,19 \cdot \sqrt[3]{\frac{k}{d_e}},$$

де k – шорсткість труби ($k = 0,1 \dots 0,2$ мм – для сталевих труб; $k = 0,8 \dots 0,1$ мм – для чавунних труб).

Місцеві втрати тиску, Па (Н/м^2):

$$\Delta P_m = \zeta \cdot \frac{\rho_0 v_0^2}{2} \left(1 + \frac{t}{273}\right),$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору; v_0 – швидкість, з якою газ підходить до даного місцевого опору.



До місцевих втрат умовно можна віднести і втрати тиску в самій установці (при цьому ζ буде залежати від багатьох факторів).

Принципи складання аеродинамічних балансів.

В основу аеродинамічного балансу покладений закон збереження маси.

Маса всіх газів, що надходять в установку (а також в цілому по всьому тракту) повинна дорівнювати масі всіх газів, що виходять з неї:

$$\sum G_{\text{пр.}} = \sum G_{\text{витр.}}$$

В статтях балансу враховується не лише розрахункова кількість газів а і вибивання газів та підсмоктування зовнішнього повітря через нещільності в установці та по газовому тракту.

Для проведення аеродинамічного розрахунку попередньо викреслюється схема аеродинамічного тракту із зазначенням всіх місцевих опорів. Схема розбивається на прямолінійні ділянки, кожна з яких характеризується своїми параметрами. Вихідними параметрами є витрати газів на кожній з ділянок V , м³/с з врахуванням можливих підсмоктування чи вибивання (залежно від величини тиску можна приймати в межах $\pm 10 \dots 20\%$ від V на ділянці); температура газів t , що задається технологічно чи за результатами попередніх розрахунків; середня густина газів ρ_0 , кг/м³ а також один з двох параметрів – площа поперечного перерізу (діаметр трубопроводу) S , м² (d , м) або швидкість руху газів v , м/с.

Значення падіння температури газів (°C/м) при проходженні їх по металевим каналам (димходам) становлять:

t , °C	300	500	700
$\Delta t/l$	2.5	5.5	10

Орієнтовно можна задаватись швидкостями газів:

- 1...2 м/с – на ділянках, що найбільш віддалені від вентиляторів (димососів);
- 8...10 м/с – на ділянках, що знаходяться найближче до вентиляторів (димососів).

Для знаходження швидкості газів використовується залежність, м/с:

$$v = \frac{V}{S}$$

Складання аеродинамічного балансу та побудови епюри тисків.

Вентилятор, що подає повітря або димові гази в теплову установку підбирається за величиною продуктивності (об'ємної подачі) V_t (м³/с), тобто кількості газів, що необхідно подавати в установку, та за величиною повного тиску чи напору (ΔP_t).



Оскільки паспортні характеристики вентиляторів і димососів складені для повітря при температурі $t=20^{\circ}\text{C}$, то значення V_t і ΔP_t , за яким підбирають вентилятор або димосос необхідно перерахувати для реального газу:

$$\Delta P'_t = \Delta P_t \cdot \frac{1,2}{\rho_t}, \text{ Н/м}^2;$$

$$V'_t = V_t \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right), \text{ м}^3/\text{с};$$

де 1,2 – густина повітря при 20°C ; t – температура повітря або газу, $^{\circ}\text{C}$; ρ_t – густина газу при температурі t ; V_t і ΔP_t – розрахункові значення об'ємної подачі і тиску.

Також рекомендується при остаточному підборі вентилятора (димососа) до величин V_t і ΔP_t додавати до 20% (для запасу і можливості регулювання подачі).

При підборі вентилятора необхідно також враховувати такий момент. Більшість теплових установок працює під невеликим розрідженням. Тому може виникнути ситуація, що при забезпеченні необхідної подачі, вентилятор може давати занадто великий напір. Або навпаки, – при забезпеченні необхідного напору, вентилятор буде мати надто великий запас по продуктивності (об'ємній подачі).

Тому, замість одного вентилятора можна у відповідному місці тракту можна ставити два або більше, з меншими значеннями V_t і ΔP_t , що працюють в паралельному (або послідовному) режимі.

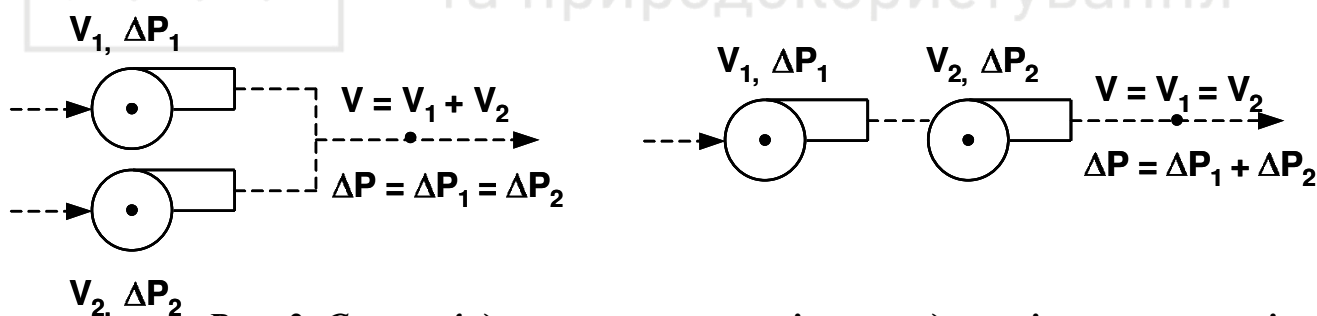


Рис. 3. Схема з'єднань вентиляторів в аеродинамічному тракту:

- а) паралельна
- б) послідовна

Нехай є наступна схема аеродинамічного тракту:



Рис. 4. Схема аеродинамічного тракту

Умовні позначення: В – вентилятор; Т.У – теплова установка (наприклад, сушарка); Ц – батарея циклонів; Д – димосос; Д.Т. – димова труба.



Для побудови епюри тиску, спочатку необхідно встановити значення ΔP_{2-3} а також знати величину необхідної подачі повітря V_2 для вибору вентилятора. Після цього потрібно прийняти вентилятор з повним динамічним тиском, який забезпечує положення т. 3 на епюрі в додатній області і, по можливості, якнайближче до нульової осі.

Нехай втрати тиску на ділянці 2-3 $\Delta P_{2-3} = 300$ Па, а величина подачі, яку повинен забезпечувати вентилятор в т.2 – $V_2 = 1,5$ м³/с. Приймаємо вентилятор з повним динамічним тиском $\Delta P_{1-2} = 0,5$ кПа і відкладаємо цю величину на епюрі тиску. Далі за наведеними вище залежностями розраховуємо всі необхідні параметри і заповнюємо таблицю аеродинамічного розрахунку та послідовно продовжуємо побудову епюри тиску.

Результати розрахунків зводяться в таблицю, яка має такий вигляд:

Таблиця 2. Розрахунки втрат тиску по аеродинамічному тракту

№ ділянок (точок)	Назва опорів	V_0 , м ³ /с	d, мм	l, м	v_0 , м/с	ρ_0 , кг/м ³	t, °C	λ	ζ	$\Delta P_{втр}$, Па	ΔP , Па
1	–	1,5	–	–	–	1,3	500	–	–	–	0
1-2	ΔP_1	1,5	–	–	–	1,3	500	–	–	+500	–
2	–	1,5	–	–	8	1,3	500	–	–	–	+500
2-3	ΔP_2	1,5	520	5	7	1,3	485	0,05	–	300	–
3	–	1,5+ +0,15*	–	–	7	1,3	470	–	–	–	+200
3-4	ΔP_3	1,65+ +0,15**	–	12	5	1,35***	250	–	–	600	–
4	–	1,75	–	–	4	1,35	120	–	–	–	-400
4-5	ΔP_4	1,75	710	4	4	1,35	120	0,08	–	20	–
5	–	1,75	–	–	4	1,35	120	–	–	–	-420
5-7	ΔP_{5-8}	1,75	800+ +750	3+4	3,5	1,35	115	0,05+ +0,05	0,8+ +1,2	50	–
7	–	1,75	–	–	3	1,35	110	–	–	–	-470
...
11	–	1,9	–	–	6	1,35	100	–	–	–	+20 (-27)
11-12	ΔP_{12}	1,9	980	30	2,5	1,35	85	0,05	–	8	–
12	ΔP_{13}	1,9	550	–	4	1,35	70	–	1,1	15	0

Примітки:

1. Умовні позначення: V_0 – витрати газів, м³/с; l – розрахункова довжина ділянки трубопроводу, м; ρ_0 – густина газів, кг/м³; t – температура газів, °C; ζ – коефіцієнт місцевого опору (або сумарний коефіцієнт гідравлічного опору); $\Delta P_{втр}$ – загальні втрати тиску на відповідній ділянці або в точці; ΔP – величина статичного тиску в певній точці тракту (значення використовуються для побудови епюри тиску). Витрати та густина газів приведені до нормальних умов.

2. Наведені величини є умовними.

3*. В т.3 витрата газів збільшилась за рахунок можливого підсмоктування зовнішнього повітря на ділянці 2-3. Це ж може відбуватись і на інших ділянках тракту.

4**. На ділянці 3-4 (ТУ) витрата газів збільшується за рахунок, наприклад, додавання вологи, що випаровується, або технологічних газів внаслідок проходження хімічних реакцій.



5***. На ділянці 3-4 (ТУ) густина газів збільшилась за рахунок процесів, описаних в п.4. Густина може як збільшуватись, так і зменшуватись залежно від парціальних густин газів, що додаються.

6. В рядку 5-7 таблиці об'єднані 4 статті втрат тиску $\Delta P_5 \dots \Delta P_8$, які включають лінійні втрати на ділянках 5-6 і 6-7 а також місцеві втрати на поворотах (т.5 і т.6). Значення $\Delta P_{\text{втр}}$ в цьому рядку – сумарне по чотирьом статтям.

7. Рядок 11-12: d – відповідає середньому діаметру труби; l – прийнятій висоті труби; v_0 – середній швидкості газів в трубі.

Визначення втрат тиску в теплових установках а також в пило-осаджуючих пристроях (фільтрах, циклонах) можна проводити за методиками наведеними у відповідній літературі, або враховувати їх як умовний місцевий опір з використанням загального коефіцієнту місцевих втрат установки (пристрою).

Пило-осаджуючі пристрої підбираються з довідкових таблиць за необхідною продуктивністю і температурою.

Димосос підбирається аналогічно до вентилятора. Також необхідно врахувати, що при спільній роботі димососа і димової труби, остання повинна створювати певне розрідження, яке додається до загальної величини ΔP . Тобто, димосос на нагнітаючій гілці повинен давати невелике додатне ΔP .

Після вибору обладнання необхідно наводити їх паспортні характеристики.

Продовжимо розрахунок аеродинамічного тракту з т. 11. Нехай, після підбору димососа і підрахунку втрат тиску на ділянці 10-11, величина статичного тиску у вказаній точці складає 20 Па. Ділянка 11-12 відповідає димовій трубі. Тому попередньо необхідно провести її розрахунок.

Найчастіше висоту труби розраховують по розрахунковій величині розрідження, яке повинна створити труба з рівняння геометричного напору:

$$P_{\Gamma} = H \cdot g \cdot (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\Gamma}),$$

де P_{Γ} – геометричний напір труби, Па; H – висота труби, м; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; $\rho_{\text{пов}}$ – густина повітря навколишнього середовища, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_{Γ} – густина газів в димовій трубі, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Величиною розрідження, яке повинна створювати димова труба, можна задаватись, знаючи величину попередніх втрат тиску:

$$\Delta P_{\text{розр}} = (1,2 \dots 1,4) \cdot \Delta P_{\text{втр}},$$

де $\Delta P_{\text{втр}}$ – сумарні втрати тиску по тракту (до точки з'єднання з димовою трубою), Па.

Але, оскільки, всі втрати тиску до входу в основу труби, згідно вищенаведеної схеми, долає димосос, то можна задатись висотою труби, а по ній розрахувати розрідження, яке фактично буде йти на подолання внутрішніх опорів в трубі.



Розрахунок димової труби.

Згідно з технологічними і санітарно-технічними нормами висота труби H не повинна бути меншою 20 м.

Діаметр гирла труби d_r розраховується при середній швидкості газів:

– 2...4 м/с – при природній тязі;

– 8...12 м/с – при димососному спрямуванні.

$$d_r = \sqrt{\frac{4V_r}{\pi \cdot v_r}},$$

де V_r – об'ємна витрата газів в гирлі, м³/с; v_r – швидкість газів в гирлі, м/с.

Діаметр основи труби, м:

$$d_o = 1,5 d_r.$$

Середній діаметр димової труби, м:

$$d_{cp} = \frac{d_r + d_o}{2}.$$

Середня швидкість газів в трубі, м/с:

$$v_{cp} = \frac{4V}{\pi \cdot d_{cp}^2},$$

де V – об'ємна витрата газів в трубі, м³/с.

Температура газів в гирлі труби, °С:

$$t_r = t_{осн} - H \cdot \Delta t,$$

де $t_{осн}$ – температура газів на вході в трубу (в основі), °С; Δt – падіння температури по висоті труби (для цегляних труб – 1...1,5 °С/м; для металевих – 2...3 °С/м).

Середня температура газів в трубі, °С:

$$t_{cp} = \frac{t_{осн} - t_r}{2}.$$

Тоді величину розрідження, що створюється димовою трубою, можна знайти з виразу:

$$\Delta P_{розр} = P_r - \Delta P_{тр} - \Delta P_m,$$

де $\Delta P_{тр}$ – втрати тиску на тертя по довжині труби; ΔP_m – місцеві втрати при виході газів із труби в атмосферу.

Геометричний напір можна знайти за наведеним вище виразом, з обов'язковим перерахунком густин газів на дійсну температуру:

$$P_r = H \cdot g \cdot (\rho_{пов}^t - \rho_r^t);$$

$$\rho_r^t = \frac{\rho_o}{1 + \frac{t_{cp}}{273}};$$



$$\rho_{\text{пов}}^t = \frac{\rho_o}{1 + \frac{t_{\text{пов}}}{273}},$$

де ρ_r^t – дійсна густина газів при їх середній температурі t_{cp} в трубі, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{пов}}^t$ – дійсна густина атмосферного повітря при температурі $t_{\text{пов}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Втрати на тертя по довжині труби:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{H}{d_{\text{cp}}} \cdot \frac{v_{\text{cp}}^2}{2} \rho_o \cdot \left(1 + \frac{t_{\text{cp}}}{273}\right),$$

де λ – коефіцієнт тертя газів об стінки труби (для цегляних труб – 0,035...0,05; для металевих – 0,025...0,03).

Місцеві втрати при виходів газів із труби:

$$\Delta P_{\text{м}} = \zeta \cdot \frac{v_r^2}{2} \rho_o \cdot \left(1 + \frac{t_r}{273}\right),$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору (розширення): $\zeta = 1,06...1,15$ (нижня межа – для більших швидкостей, нижня – для менших).

Визначена величина розрідження відкладається на епюрі тисків від нульової осі вертикально вниз (див. епюру тисків).

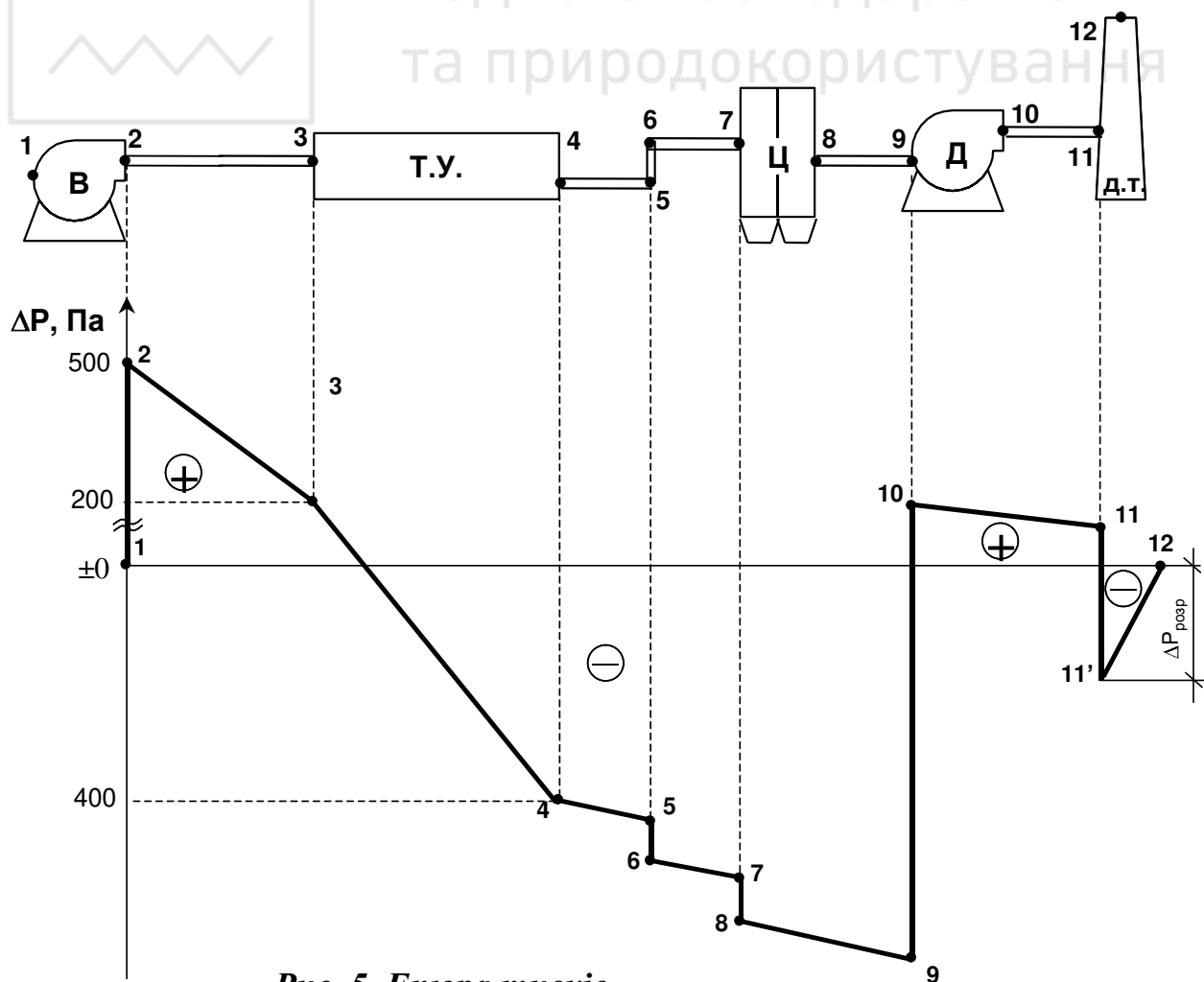


Рис. 5. Епюра тисків

Необхідно розрахувати та звести в підсумкову таблицю основні техніко-економічні показники, що стосуються процесу теплової обробки. Орієнтовний перелік показників:

Показники	Значення
1. Продуктивність <i>установки</i> : – річна, т/рік – годинна, т/год.	
2. Питомі втрати на 1 кг <i>продукту</i> : – теплової енергії, кДж/кг – <i>палива</i> , кг/кг – умовного палива, кг/кг	
3. Питомі витрати на 1 годину роботи <i>установки</i> – <i>палива</i> , кг/кг – умовного палива, кг/кг	
4. Питомий зйом <i>продукту</i> – з 1 м ³ робочого об'єму <i>установки</i> , кг/(м ³ ·год) – з 1 м ² робочої площі (внутр.), кг/(м ² ·год)	
5. Загальний аеродинамічний опір тракту, Па	

В загальних висновках відобразити основні результати розрахунків, вказати можливі шляхи підвищення ефективності теплового процесу та роботи *установки*.



3. Додатки

Додаток 1

Формули для розрахунку горіння природного газу

Розрахунки горіння природного газу (на 1 м³)

Теоретично необхідна кількість сухого повітря:

$$L_0 = 0,0476 \cdot (2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} + 8\text{C}_5\text{H}_{12})$$

Теоретично необхідна кількість атмосферного повітря з врахуванням його вологості:

$$L_0' = (1 + 0,0016 \cdot d) \cdot L_0$$

З врахуванням коефіцієнту надлишку повітря для горіння α , витрати:

– сухого повітря $L_\alpha = \alpha \cdot L_0$;

– атмосферного повітря $L_\alpha' = \alpha \cdot L_0'$.

Кількість і склад продуктів горіння при коефіцієнті надлишку α :

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10} + 5\text{C}_5\text{H}_{12})$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \cdot (2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{C}_4\text{H}_{10} + 6\text{C}_5\text{H}_{12} + 0,16 \cdot d \cdot L_\alpha)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L_\alpha + 0,01 \cdot \text{N}_2$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0$$

Загальна кількість продуктів горіння:

$$V_\alpha = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}$$

Матеріальний баланс процесу горіння на 100 м³ газу, приведенного до нормальних умов, при $\alpha = 1,2$.

Матеріальний баланс процесу горіння

Прихідна частина	кг	Витратна частина	кг
Природний газ		Продукти згорання	
CH ₄ =%·ρ		CO ₂ =V _{CO₂} · 100·ρ	
C ₂ H ₆		H ₂ O	
C ₃ H ₈		N ₂	
C ₄ H ₁₀		O ₂	
C ₅ H ₁₂		Нев'язка	
CO ₂			
N ₂			
Повітря			
O ₂ =(L ₀ /0,0476)·α·ρ			
N ₂ =(L ₀ /0,0476)·α·ρ·3,762			
H ₂ O=0,16·d·L _α ·ρ			
Всього		Всього	



Приклад розрахунку горіння природного газу

Розрахунок горіння палива (природний газ Шебелинського родовища) Склад сухого газу, % за об'ємом

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂
93.2	4.4	0.8	0.6	0.3	0.1	0.8

Розрахунки ведемо на 1 м³ природного газу.

Визначаємо нижчу теплоту згоряння газу:

$$Q_n = 358 \cdot \text{CH}_4 + 638 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 913 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1187 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1461 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} = 358 \cdot 93,2 + 638 \cdot 4,4 + 913 \cdot 0,8 + 1187 \cdot 0,6 + 1461 \cdot 0,3 = 35842 \text{ кДж/м}^3.$$

Вища теплота згоряння газу:

$$Q_v = 398 \cdot \text{CH}_4 + 695 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 993 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1286 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1580 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} = 398 \cdot 93,2 + 695 \cdot 4,4 + 993 \cdot 0,8 + 1286 \cdot 0,6 + 1580 \cdot 0,3 = 39639 \text{ кДж/м}^3.$$

Теоретично необхідну кількість сухого повітря визначаємо за формулою:

$$L_o = 0,0476 \cdot (2 \cdot \text{CH}_4 + 3,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 6,5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 8 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12}) = 0,0476 \cdot (2 \cdot 93,2 + 3,5 \cdot 4,4 + 5 \cdot 0,8 + 6,5 \cdot 0,6 + 8 \cdot 0,3) = 10,09 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Приймаємо вологовміст атмосферного повітря $d=10$ г/кг сух.пов. і знаходимо теоретично необхідну кількість атмосферного повітря з врахуванням його вологості:

$$L_o' = (1 + 0,0016 \cdot d) \cdot L_o = (1 + 0,0016 \cdot 10) \cdot 10,09 = 10,25 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Приймаємо коефіцієнт надлишку повітря для горіння $\alpha=1.2$. Тоді витрати:

$$\text{– сухого повітря } L_\alpha = 1,2 \cdot 10,09 = 12,11 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$\text{– атмосферного повітря } L_\alpha' = 1,2 \cdot 10,25 = 12,3 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Визначаємо кількість і склад продуктів горіння при $\alpha=1.2$:

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot (\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10} + 5 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12}) = 0,01 \cdot (0,1 + 93,2 + 2 \cdot 4,4 + 3 \cdot 0,8 + 4 \cdot 0,6 + 5 \cdot 0,3) = 1,08 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{C}_4\text{H}_{10} + 6 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 0,16 \cdot d \cdot L_\alpha) = 0,01 \cdot (2 \cdot 93,2 + 3 \cdot 4,4 + 4 \cdot 0,8 + 5 \cdot 0,6 + 6 \cdot 0,3 + 0,16 \cdot 10 \cdot 12,11) = 2,27 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot L_\alpha + 0,01 \cdot \text{N}_2 = 0,79 \cdot 12,11 + 0,01 \cdot 0,8 = 9,57 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_o = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 10,09 = 0,42 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Загальна кількість продуктів горіння:

$$V_\alpha = 1,08 + 2,27 + 9,57 + 0,42 = 13,34 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Складаємо матеріальний баланс процесу горіння на 100 м³ газу, приведенного до нормальних умов, при $\alpha = 1,2$.



Матеріальний баланс процесу горіння

Прихідна частина	м ³	Витратна частина	м ³
Природний газ		Продукти згорання	
CH ₄	93,4	CO ₂	108,0
C ₂ H ₆	4,4	H ₂ O	227,0
C ₃ H ₈	0,8	N ₂	957,0
C ₄ H ₁₀	0,6	O ₂	42,0
C ₅ H ₁₂	0,3	Нев'язка	-4,2
CO ₂	0,1		
N ₂	0,8		
Повітря			
O ₂	254,0		
N ₂	956,0		
H ₂ O	19,4		
Всього	1329,8	Всього	1329,8

Нев'язка балансу складає: $\frac{100 \cdot 4,2}{1329,8} = 0,32\%$.

Визначимо теоретичну температуру горіння (t_T). Для цього запишемо рівняння теплового балансу процесу горіння на 1 м³ палива:

$$Q_H + L_{\alpha} \cdot c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} + c_{\text{пл}} \cdot t_{\text{пл}} = V_{\alpha} \cdot t_T \cdot c_{\text{д.г.}}$$

де $c_{\text{пов}}$ – теплоємність повітря при $t_{\text{пов}}$.

Нехай температура повітря $t_{\text{пов}} = 20^{\circ}\text{C}$. Тоді $c_{\text{пов}} \approx 1,3 \text{ кДж/м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

$c_{\text{пл}}$ – теплоємність палива при $t_{\text{пл}}$.

Для природного газу можна прийняти $c_{\text{пл}} = 1,6 \text{ кДж/м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ при $t_{\text{пл}} = 20^{\circ}\text{C}$.

$c_{\text{д.г.}}$ – теплоємність димових газів при t_T .

Для природного газу існує залежність $c_{\text{д.г.}} = 1,355 + 0,000075 \cdot t_{\text{д.г.}}$, [кДж/м³·°C],

де $t_{\text{д.г.}}$ – температура димових газів, °C.

Якщо прийняти $t_T = t_{\text{д.г.}}$, то теоретичну температуру горіння можна однозначно визначити з рівняння теплового балансу:

$$35842 + 12,3 \cdot 1,3 \cdot 20 + 1,6 \cdot 20 = 13,34 \cdot t_T \cdot (1,355 + 0,000075 \cdot t_T).$$

Звідси $t_T = 1727^{\circ}\text{C}$.



Параметри окремих газів та матеріалів

Густина окремих газів, ρ_0 , кг/м³

Водень Н ₂	0,0898
Оксид вуглецю СО	1,250
Сірководень Н ₂ С	1,539
Метан СН ₄	0,717
Етилен С ₂ Н ₄	1,261
Етан С ₂ Н ₆	1,356
Пропан С ₃ Н ₈	2,020
Бутан С ₄ Н ₁₀	2,840
Пентан С ₅ Н ₁₂	3,218
Гексан С ₆ Н ₁₄	3,840
Кисень О ₂	1,429
Азот N ₂	1,251
Двоокис вуглецю СО ₂	1,977
Водяна пара Н ₂ О	0,804
Сірчистий газ SO ₂	2,852
Повітря	1,293

Середні теплоємності газів при різних температурах, кДж/(м³·°С)

t, °С	СО ₂	N ₂	О ₂	Н ₂ О	сухе повітря
0	1,5998	1,2946	1,3059	1,4943	1,2971
100	1,7003	1,2959	1,3176	1,5052	1,3005
200	1,7874	1,2996	1,3352	1,5224	1,3076
300	1,8628	1,3068	1,3562	1,5425	1,3177
400	1,9298	1,3164	1,3775	1,5655	1,3294
500	1,9888	1,3277	1,3980	1,5898	1,3428
600	2,0412	1,3402	1,4168	1,6149	1,3570
700	2,0885	1,3537	1,4345	1,6413	1,3712
800	2,1312	1,3670	1,4500	1,6681	1,3846

Параметри насиченої водяної пари

	t _н , °С							
	0	10	20	50	80	100	125	150
i, кДж/кг	2501	2519	2537	2592	2643	2676	2713	2746
г, кДж/кг	2501	2477	2454	2383	2308	2254	2188	2114



Ентальпія повітря та димових газів, кДж/м³

Від 0° до t, °C	Повітря сухе	Повітря вологе (d = 10 г/кг)	Продукти горіння при $\alpha = 1.2$	
			генераторного газу	природного га- зу
100	129,8	130,2	138,2	136,5
200	261,3	262,1	280,1	275,5
300	394,8	397,3	425,8	417,4
400	531,3	535,9	574,5	564,0
500	671,2	671,8	729,4	713,5
600	814,4	816,5	887,2	866,3
700	959,2	963,0	1043,8	1025,0
800	1106,6	1110,0	1213,8	1185,3
900	1258,2	1262,4	1382,5	1341,5

Теплофізичні характеристики матеріалів

Матеріал	$\rho_{\text{ср}}, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$	$c, \text{кДж/(кг}\cdot\text{°C)}$
Бетон	2400	1,45	0,84
Залізобетон	2400	1,56	0,84
Метал (сталь)	7800	56,0	0,46
Керамзитобетон	900	0,408	0,88
Кварцовий пісок	1500	0,6	0,796
Вапняк	–	–	0,930
Глина	–	–	0,921
Доменний гранульов. шлак	–	–	0,754
Мінеральна вата	300	0,063	0,75
Дерево	640	0,38	2,40
Накип	1200	0,20	–
Цегла: звичайна	1800	0,47	0,921
шамотна	1200	0,35	0,837
діатомітова	1100	0,27	0,845
Вода при t, °C			
0	1001	0,551	4,221
20	999	0,596	4,185
60	984	0,650	4,187



Значення динамічної та кінематичної в'язкості газів при $P = 760$ мм рт.ст.

Температура, °С	Динамічна в'язкість, $\eta \cdot 10^{-6}$, Па	Кінематична в'язкість $\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с
повітря		
0	17,16	13,3
100	21,96	23,2
200	26,08	34,9
300	29,71	48,3
400	34,03	63,1
500	36,28	79,2
600	39,12	96,8
700	41,77	115,1
800	44,32	134,7
димові гази		
0		12,2
100		21,5
200		32,8
300		45,8
400		60,4
500		76,3
600		93,6
700		112,1
800		131,8
водяна пара Н ₂ О		
0	8,13	10,2
100	12,06	20,5
200	16,18	34,8
300	20,20	52,7
400	24,32	74,6
500	28,34	100,0
600	32,46	129,3
700	36,58	160,2
800	40,60	190,7



Фізичні властивості вологого повітря ($P = 101.325 \text{ кН/м}^2$)

t, °C	Середня густина ρ , кг/м^3		Парціальний тиск насиченої водяної пари у суміші p , кН/м^2	Ентальпія вологого повітря i , кДж/кг
	сухе повітря	насичена пароповітряна суміш		
0	1,293	1,29	0,69	9,39
5	1,27	1,266	0,81	18,48
10	1,246	1,242	1,84	29,25
15	1,226	1,218	1,71	40,6
20	1,205	1,195	2,34	56,6
30	1,165	1,146	4,24	97,1
40	1,128	1,097	7,35	157,3
50	1,093	1,043	12,3	232,5
60	1,06	0,983	19,9	398
70	1,029	0,912	31,1	625
80	1	0,826	47,3	990
90	0,973	0,724	80	1634
100	0,947	0,599	101,32	2676

Параметри пароповітряної суміші при 101,3 кПа

Температура суміші, °C	Парціальний тиск насиченої водяної пари в суміші, кПа	Густина, кг/м^3	
		сухого повітря	насиченої пароповітряної суміші
5	0,872	1,27	1,270
10	1,288	1,248	1,242
15	1,705	1,226	1,218
20	2,338	1,205	1,195
24	2,984	1,189	1,176
28	3,780	1,173	1,156
32	4,754	1,157	1,136
36	5,941	1,142	1,116
40	7,375	1,128	1,097
44	9,101	1,114	1,076
48	11,604	1,100	1,054
52	13,612	1,086	1,031
55	16,732	1,076	1,013
60	19,918	1,060	0,983
62	21,838	1,054	0,969



64	23,905	1,048	0,957
66	26,145	1,041	0,942
68	28,558	1,035	0,929
70	31,157	1,029	0,912
72	33,944	1,023	0,896
74	36,967	1,017	0,879
76	40,183	1,011	0,863
78	43,636	1,006	0,844
80	47,343	1,000	0,826
82	51,222	0,944	0,807
84	55,569	0,989	0,786
86	60,115	0,983	0,769
88	64,941	0,978	0,746
90	70,101	0,973	0,724
92	75,594	0,967	0,701
94	81,447	0,962	0,678
96	87,673	0,957	0,652
98	94,299	0,961	0,625
100	101,325	0,947	0,599

Параметри насиченої водяної пари від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{кПа}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$i, \text{кДж/кг}$	$i_{\text{п}}, \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$
0	0,6108	0,00485	0	2501	2501
10	1,2271	0,0094	41,99	2519	2477
20	2,3368	0,0173	83,86	2538	2454
30	4,2417	0,0304	126,66	2556	2430
40	7,3749	0,0512	167,46	2574	2407
50	12,633	0,0831	209,26	2592	2383
60	19,919	0,1302	251,09	2610	2358
70	31,161	0,1982	292,97	2627	2334
80	47,359	0,2934	334,92	2644	2309
90	70,108	0,4235	376,94	2660	2283
100	101,325	0,5977	419,06	2676	2257
120	198,54	1,121	503,7	2707	2203
140	361,36	1,966	589,1	2734	2145
160	618,04	3,258	675,5	2758	2082
180	1002,7	6,157	763,1	2777	2014
200	1555,1	7,862	852,4	2791	1939
250	3980	19,98	1085,7	2801	1715
300	8590	46,21	1344,9	2749	1404



4. Перелік рекомендованої літератури

1. Бордюженко О. М., Шестаков В. Л. Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання: Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення.: Ч.1. Технічна термодинаміка. Процеси і апарати для високотемпературної обробки матеріалів. - Рівне: НУВГП, 2008. 224 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/2258>.
2. Бордюженко О. М. Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання : навчальний посібник: Ч.2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону. Рівне : НУВГП, 2010. 230 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/2268>.
3. Бордюженко О. М., Карпюк А. А. Теплові установки промисловості будівельних матеріалів : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2012. 123 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/7419>.
4. Гоц В. І., Кокшарьов В. М., Павлюк В. В., Тимошенко С. А. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів : підручник. К. : Основа, 2014. 360 с.
5. Драганов Б. Х., Долінський А. А. та ін. Теплотехніка. Київ : 2005.
6. Перегудов В. В. Теплотехника и теплотехническое оборудование / Под ред. Н. Ф. Еремина. М. : Стройиздат, 1990.
7. Перегудов В. В., Роговой М. И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей. Москва : Стройиздат, 1983.
8. Роговой М. И., Кондакова М. Н., Сагановский М. Н. Расчеты и задачи по теплотехническому оборудованию предприятий промышленности строительных материалов. М. : Стройиздат, 1975.
9. Мазуров Д. Я. Теплотехническое оборудование заводов вяжущих материалов. М. : Стройиздат, 1982.
10. Дворкін Л. Й., Шестаков В. Л. Проектування підприємств для виробництва в'язучих матеріалів. К. : ІЗМН, 1996.
11. Шестаков В.Л. Задачі та вправи з технічної термодинаміки та теплових процесів технології будівельних матеріалів. Рівне : НУВГП, 2008.