

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання розрахункового завдання

### **«Розрахунок основних розмірів та параметрів роботи барабанної сушарки»**

з курсу «Механічне обладнання підприємств»  
для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»  
освітньої програми «Хімічні технології тугоплавких неметалевих і  
силікатних матеріалів» усіх форм навчання

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол № 2 від 25.06.2020 р.

Харків  
НТУ «ХП»  
2020

Методичні вказівки до виконання розрахункового завдання «Розрахунок основних розмірів та параметрів роботи барабанної сушарки» з курсу «Механічне обладнання підприємств» для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» освітньої програми «Хімічні технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів» усіх форм навчання / уклад. А. О. Нагорний. – Харків: НТУ «ХП», 2020.

Укладач А. О. Нагорний

Рецензент О. Ю. Федоренко

Кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей

## Вступ

Виконання розрахункового завдання з дисципліни «Механічне обладнання підприємств» покликане активізувати навчальний процес шляхом досягнення таких цілей:

- закріплення знань, що студенти одержують при вивченні дисципліни;
- роз'яснення взаємозв'язку конструктивних особливостей обладнання з процесом горіння палива та розрахунками теплових видатків;
- поглиблення розуміння студентами особливостей процесів теплообміну та їх впливу на основні конструктивні розрахунки і режим роботи технологічного обладнання та ін.

Розрахункове завдання обов'язково вміщує такі розрахунки:

- основних розмірів та фактичної продуктивності технологічного обладнання;
- кількості повітря та продуктів згорання заданого виду палива;
- витрат тепла та димових газів, визначення витрати палива для процесу сушіння заданого матеріалу.

Окремо наводяться висновки щодо виконаного завдання.

### **1. Характеристика барабанних сушарок для сушіння кускових сипучих матеріалів**

Барабанні сушарки отримали розповсюдження в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів (ТНСМ) для сушіння сипучих та дрібнокускових матеріалів з розміром кусків до 50 мм. Основна частина сушарки (рис. 1.1) – зварний циліндричний барабан, встановлений під кутом 3–6 ° у бік вивантажувальної камери. Барабан має довжину 4–30 м та діаметр 0,1–3,2 м. Характеристика сушильних барабанів наведена у табл. 1.1.

Привід барабана здійснюється від електродвигуна через редуктор, коробку швидкостей та пару циліндричних шестерень, більша з яких насаджена на кожух барабана. Частота обертань барабана зазвичай становить 0,5–8 об/хв. Матеріал потрапляє до барабана з бункера за допомогою дозувального пристрою, висушується, а потім зсипається у бункер, розташований у вивантажувальній камері і шнеком видаляється назовні.

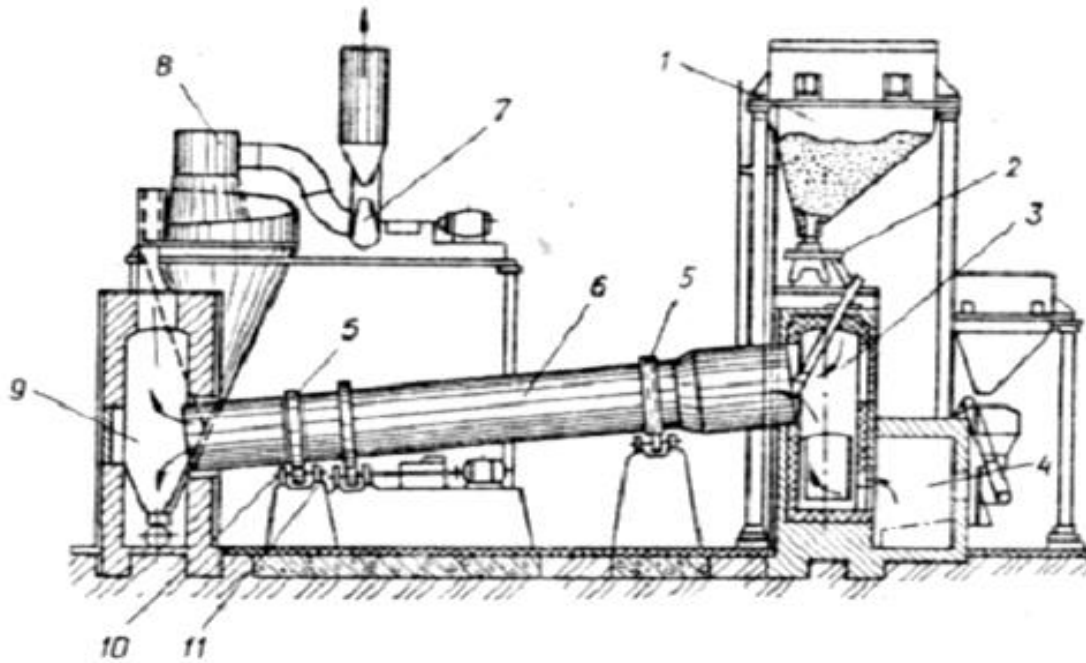


Рис. 1.1. Барабанна сушарка:

1 – бункер матеріалу; 2 – тарілчастий живильник; 3 – змішувальна камера; 4 – топка;  
 5 – опорні бандажі; 6 – сталевий барабан; 7 – витяжний вентилятор; 8 – циклон;  
 9 – вивантажувальна камера; 10 – опорні ролики; 11 – привід

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики сушильних барабанів

Показники	Номери барабанів					
	1	2	3	4	5	6
Внутрішній об'єм $V_0$ , м <sup>3</sup>	14,2	30,5	45,5	53,2	74	86
Довжина $L$ , м	8,0	12,0	12,0	14,0	14,0	14,0
Внутрішній діаметр $D$ , м	1,5	1,8	2,2	2,2	2,8	2,8
Кількість комірок	25	28	28	28	51	51
Товщина (без ізоляції) $S$ , мм	10	12	14	14	14	14
Загальна вага $G$ , т	13,6	24	42	46	65	70

У якості сушильного агента у барабанних сушарках використовують підігріте повітря (для низькотемпературних режимів) та суміш димових газів з атмосферним повітрям (для високотемпературних режимів). Рух матеріалів і сушильного агента всередині сушарки може бути прямоточним або протиточним. Якщо необхідно досягти глибокого висушу-

вання матеріалу або коли матеріал не витримує високої температури у початковий період сушіння і може бути нагрітим до вищої температури наприкінці сушіння, схема руху може бути протиточною. Проте для більшості випадків є притаманною прямою прямою схемою руху. Прямотечія забезпечує менше пилоутворення та пиловинесення; вологі та пластичні матеріали легше віддають початкову вологу та швидше набувають необхідної сипучості. Сушіння глин, для яких є неприпустимою втрата пластичності внаслідок перегріву, відбувається у барабанах за режимом прямої прямої. При цьому є неприпустимою висока початкова температура газів, що потрапляють до барабана (до 1000 °C), але матеріал при сушінні надмірно не нагрівається. Зазвичай за температури відхідних газів 110–120 °C матеріал залишає сушарку за температури 70–90 °C. Швидкість руху газів у барабані має бути у межах 2,5–3 м/с для запобігання надмірного пиловиносу. На рис. 1.1 наведена прямою прямою барабанна сушарка без рециркуляції газів. Режимні параметри барабанних сушарок наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Режимні параметри сушіння матеріалів у барабанних сушарках

Матеріал	Вологість матеріалу, % на суху масу		Температура газів, °C		Напруженість барабана за вологою, кг/(м <sup>3</sup> ·год)
	початкова	кінцева	на вході	на виході	
Глина червона	25–20	4–6	700–850	60–100	40–60
Глина вогнетривка	8–10	0,5–1	800–1000	70–80	60
Каолін	20–30	0,5–1	800–1000	60–100	30–45
Пісок	7–15	0,3–3	840–900	90–100	80–100
Вапняк	10–12	0,5–2	800–1000	60–100	30–45

З метою інтенсифікації процесів теплообміну та сушіння, покращення змішування та переміщення матеріалу вздовж барабана його внутрішня порожнина заповнюється різноманітними насадками або поділяється на комірки (рис. 1.2). При сушінні великокускових матеріалів, що тяжіють до налипання, на стінках барабана встановлюють повздовжні лопаті (підйомно-лопатева система). При сушінні дрібнокускових матеріалів по всьому перетину барабана встановлюють полки, які забезпечують надійне змішування матеріалу (розподільна система). Для вкрай дрібних матеріалів, що тяжіють до пилоутворення, застосовують замкнену коміркову систему внутрішніх пристроїв, у якій матеріал лише перевалюється при обертанні барабана за невеликої висоти падіння. Комірки не сполучаються одна з одною.

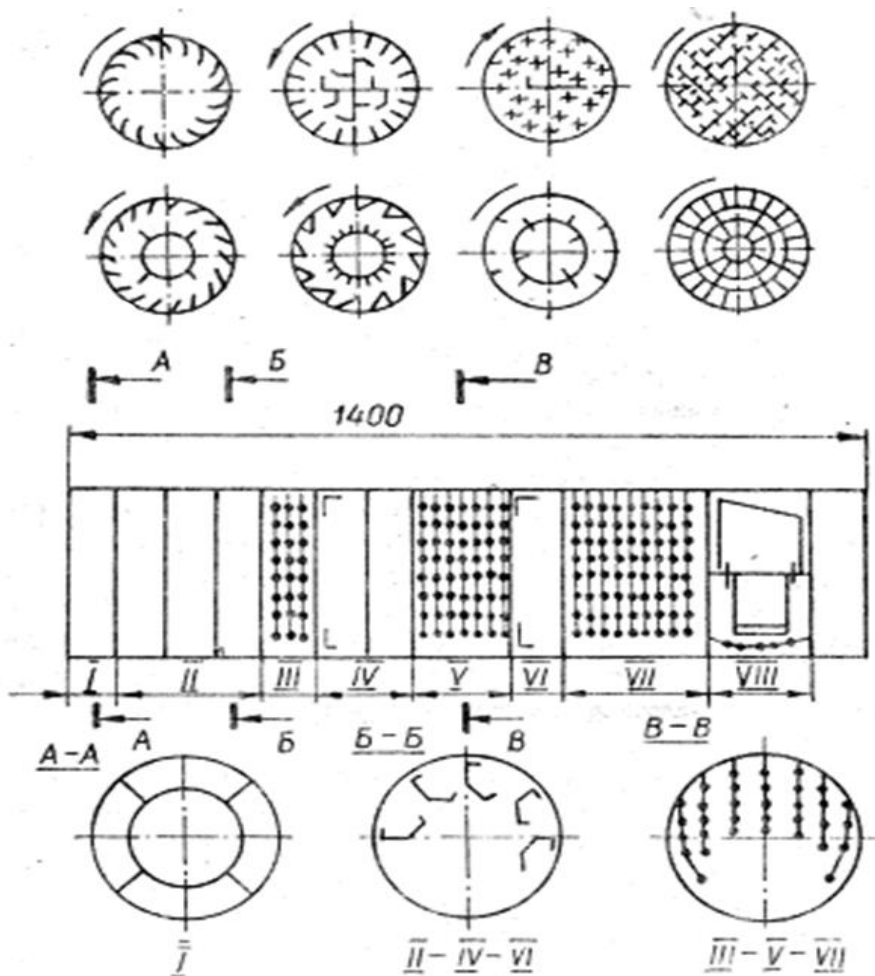


Рис. 1.2. Схеми насадок на навіски ланцюгів барабаних сушарок

Для підвищення рівномірності сушіння матеріалу, продуктивності барабана та часткового суміщення сушіння та розмелу застосовують навіску ланцюгів, які замінюють певну частину внутрішніх насадок по довжині барабана. Ступінь заповнення барабана матеріалом коливається у межах 0,05–0,2. Найбільша ступінь заповнення може бути досягнута у сушильних барабанах з комірковими внутрішніми пристроями.

## 2. Розрахунок розмірів сушильного барабана

Розміри сушильного барабана зазвичай обираються виходячи з необхідного внутрішнього об'єму барабана. При цьому діаметр барабана спочатку приймається наближено, потім виконується тепловий розрахунок за допомогою якого визначаються необхідні розміри барабана. Також робиться перевірка швидкості газів на виході з барабана. Алгоритм такого розрахунку наведений нижче.

Основні розміри барабана – довжина  $L$  та діаметр  $D_6$ , м, визначаються за допомогою формули (2.1) для необхідного внутрішнього об'єму барабана  $V_6$ , м<sup>3</sup>:

$$V_6 = \frac{n}{m_0} = \frac{\pi \cdot D_6^2}{4} \cdot L, \quad (2.1)$$

де  $n$  – кількість вологи, що випаровується з матеріалу, кг/год;  $m_0$  – напруженість об'єму барабана за вологою, кг/(м<sup>3</sup>·год) (див. табл. 1.2).

Кількість вологи, що випаровується з матеріалу, можна визначити за формулою (2.2):

$$n = P_M \cdot \frac{w_{\text{поч}} - w_{\text{к}}}{100 - w_{\text{поч}}}, \quad (2.2)$$

де  $P_M$  – надана продуктивність сушарки по висушеному матеріалу, кг/год;  $w_{\text{поч}}$  та  $w_{\text{к}}$  – відповідно надані початкова та кінцева відносні вологості матеріалу, %.

Внутрішній об'єм барабана можна також визначити з рівняння (2.3) для кількості тепла, що передається від газів до матеріалу всередині барабана, Вт:

$$Q = \alpha_V \cdot \Delta t_{\text{сер}} \cdot V_6, \quad (2.3)$$

де  $\alpha_V$  – об'ємний коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до одиниці вільного об'єму барабана, який не зайнятий насадками, Вт/(м<sup>3</sup>·°C); значення  $\alpha_V$  залежить від вологості матеріалу, що висушується, розміру його часток та ін., максимальне значення  $\alpha_V$  становить 290 Вт/(м<sup>3</sup>·°C);  $\Delta t_{\text{сер}}$  – середня логарифмічна різниця температур між газами і матеріалом на початку та наприкінці процесу сушіння, яка визначається за формулою (2.4), °C:

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{(t_{\text{поч.газ}} - t_{\text{поч.м}}) - (t_{\text{к.газ}} - t_{\text{к.м}})}{\ln \frac{t_{\text{поч.газ}} - t_{\text{поч.м}}}{t_{\text{к.газ}} - t_{\text{к.м}}}} + t_{\text{сер.м}}, \quad (2.4)$$

де  $t_{\text{сер.м}}$  – середня температура матеріалу, яка розраховується за такою формулою, °C:

$$t_{\text{сер.м}} = t_{\text{поч.м}} + 2/3 \cdot (t_{\text{к.м}} - t_{\text{поч.м}}).$$

Кількість тепла, що передається від газів до матеріалу і витрачається на випаровування вологи та нагрів матеріалу, можна визначити за формулою (2.5), Вт:

$$Q = (2493 + 1,97 \cdot t_{\text{відх}} - 4,2 \cdot t_{\text{м}}) \cdot 0,278 \cdot n + 0,278 \cdot q_{\text{м}}, \quad (2.5)$$

де  $t_{\text{відх}}$  – температура відхідних газів, тобто температура, яку мають гази на виході з барабана, °С (може бути прийнятою за допомогою табл. 1.2);  $t_{\text{м}}$  – початкова температура, з якою матеріал потрапляє до барабана, °С;  $q_{\text{м}}$  – витрата тепла на нагрів матеріалу, розраховується за формулою (2.6), кДж/год:

$$q_{\text{м}} = P_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{поч}}), \quad (2.6)$$

де  $c_{\text{м}}$  – теплоємність висушеного матеріалу за кінцевої вологості  $w_{\text{к}}$ , яка розраховується за формулою (2.7), кДж/(кг·°С):

$$c_{\text{м}} = c_{\text{с}} \cdot \frac{100 - w_{\text{к}}}{100} + \frac{4,2 \cdot w_{\text{к}}}{100}, \quad (2.7)$$

де  $c_{\text{с}}$  – теплоємність абсолютно сухого матеріалу, кДж/(кг·°С) (див. табл. 2.1);  $t_{\text{к}}$ ,  $t_{\text{поч}}$  – кінцева температура матеріалу при виході з сушарки та початкова температура матеріалу, що надходить у сушарку, °С.

Таблиця 2.1 – Середня теплоємність деяких матеріалів

Матеріал	$c_{\text{с}}$ , кДж/кг·°С	Матеріал	$c_{\text{с}}$ , кДж/кг·°С
Антрацит	0,908	Пісок кварцовий	0,796
Вапняк	0,921	Польовий шпат	0,800
Глина	0,921	Силіманіт	0,837
Динас	0,796	Фарфор	1,089
Доломіт	0,930	Форстерит	0,888
Каолін	0,800	Хромомагнезит	0,754
Кераміка	0,837	Цегла будівельна	0,921
Крейда	0,879	Шамот	0,837
Магнезит	0,963	Шлак доменний	0,754

Тоді об'єм барабана (без урахування об'єму, зайнятого насадками та спрямовуючими лопатями) за формулою (2.8) становитиме, м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{б}} = \frac{Q}{\alpha_{\text{в}} \cdot \Delta t_{\text{сер}}}. \quad (2.8)$$

Швидкість газів, що залишають барабан, можна розрахувати за формулою (2.9), м/с:

$$v_{\text{газ}} = \frac{4 \cdot V_{\text{газ}}}{3600 \cdot \pi \cdot D_0^2 \cdot (1 - \beta)}, \quad (2.9)$$

де  $V_{\text{газ}}$  – кількість газів, які залишають барабан, м<sup>3</sup>/год, визначається під час теплового розрахунку;  $\beta$  – коефіцієнт заповнення барабана матеріалом, знаходиться у межах 0,15–0,20 при сушінні піску та глини.

Наприклад, розрахунок основних розмірів барабанної сушарки для сушіння глини продуктивністю 10 т/год по висушеній глині від початкової відносної вологості  $w_{\text{поч}} = 20\%$  до кінцевої  $w_{\text{к}} = 6\%$ , проводять таким чином.

Спочатку за формулою (2.2) визначають кількість вологи, що випаровується з глини під час сушіння з урахуванням наданої продуктивності сушарки  $P_{\text{м}} = 10000$  кг/год:

$$n = 10000 \cdot \frac{20 - 6}{100 - 20} = 1750 \text{ кг/год.}$$

Далі за допомогою табл. 1.2 приймають напруженість об'єму барабана за вологою  $m_0 = 60$  кг/(м<sup>3</sup>·год), для якої необхідний внутрішній об'єм барабана, без урахування заповнення його насадками, за формулою (2.1) становитиме:

$$V_0 = \frac{n}{m_0} = \frac{1750}{60} = 29,2 \text{ м}^3.$$

Скориставшись табл. 1.1, за розрахованим об'ємом обирають барабан номер 2, довжиною 12 м та діаметром 1,8 м, внутрішній об'єм цього барабана становить 30,5 м<sup>3</sup>.

Після цього необхідно перевірити об'єм барабанної сушарки за допомогою теплового розрахунку за формулою (2.8). Такий розрахунок передбачає визначення кількості тепла, що передається від газів до матеріалу і витрачається на випаровування вологи та нагрів глини.

Для розрахунку витрати тепла на нагрів глини, що висушується, необхідно попередньо розрахувати теплоємність висушеної глини за її кінцевої вологості  $w_{\text{к}} = 6\%$ . Для цього з табл. 2.1 для глини обирають  $c_{\text{с}} = 0,921$  кДж/(кг·°С) та за формулою (2.7) отримують:

$$c_M = 0,921 \cdot \frac{100 - 6}{100} + \frac{4,2 \cdot 6}{100} = 1,118 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

Приймають, що кінцева температура глини при виході з барабана  $t_k$  та початкова температура глини, що надходить у барабан  $t_{\text{поч}}$  відповідно дорівнюють 90 та 10 °С. Тоді витрата тепла на нагрів глини, що висушується, за формулою (2.6) становитиме:

$$q_M = 10000 \cdot 1,118 \cdot (90 - 10) = 894400 \text{ кДж/год}.$$

Сушіння відбувається топковими газами, розбавленими атмосферним повітрям у змішувальній камері на вході до барабана. Початкова температура сушіння – 800 °С, кінцева – 110 °С, що відповідає температурі, яку мають гази на виході з барабана  $t_{\text{відх}}$ .

З урахуванням прийнятих параметрів процесу сушіння, кількість тепла, що передається від газів до матеріалу і витрачається на випаровування вологи та нагрів глини, за формулою (2.5) становитиме:

$$Q = (2493 + 1,97 \cdot 110 - 4,2 \cdot 10) \cdot 0,278 \cdot 1750 + 0,278 \cdot 894400 = 1546479 \text{ Вт}.$$

Середню температуру глини розраховують за формулою:

$$t_{\text{сер.м}} = t_{\text{поч.м}} + 2/3 \cdot (t_{\text{к.м}} - t_{\text{поч.м}}) = 10 + 2/3 \cdot (90 - 10) = 63 \text{ °С}.$$

Тоді середня логарифмічна різниця температур між газами і глиною на початку та наприкінці процесу сушіння, за формулою (2.4) складатиме:

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{(800 - 10) - (110 - 90)}{\ln \frac{790}{20}} + 63 = 272 \text{ °С}.$$

Приймають об'ємний коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_V = 200 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)}$ , за якого об'єм барабана за формулою (2.8) становитиме:

$$V_6 = \frac{1546479}{200 \cdot 272} = 28,4 \text{ м}^3.$$

Значення об'ємів барабана, отримані за формулами (2.1) та (2.8), не відрізняються одне від одного більш ніж на 10 %, тому обрані раніше розміри барабана  $L = 12 \text{ м}$  та  $D_6 = 1,8 \text{ м}$  залишають.

Фактичну продуктивність барабана за висушеною глиною можна перерахувати за допомогою формули (2.2), якщо у вираз для  $n = m_0 \cdot V_6$ , підставити значення  $V_6 = 30,5 \text{ м}^3$ :

$$P_M = m_0 \cdot V_6 \cdot \frac{100 - w_{\text{поч}}}{w_{\text{поч}} - w_{\text{к}}} = 60 \cdot 30,5 \cdot \frac{80}{14} = 10457 \text{ кг/год.}$$

За наданої продуктивності  $P_M = 10000 \text{ кг/год}$  напруженість об'єму барабана за вологою за формулою (2.2) становитиме:

$$m_0 = \frac{P_M \cdot (w_{\text{поч}} - w_{\text{к}})}{V_6 \cdot (100 - w_{\text{поч}})} = \frac{10000 \cdot 14}{30,5 \cdot 80} = 57,4 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{год)}.$$

Продуктивність за абсолютно сухою глиною за формулою (2.10) становитиме:

$$P_c = P_M \cdot \frac{100 - w_{\text{к}}}{100} = 10000 \cdot \frac{94}{100} = 9400 \text{ кг/год.}$$

Тоді кількість остаточної вологи дорівнюватиме 600 кг/год.

### 3. Розрахунок горіння палива

Як було зазначено у розділі 1, процес сушіння у барабанних сушарках відбувається за високих температур сушильного агента (суміші димових газів з повітрям) на вході до сушарки (див. табл. 1.2). Такі температури мають бути забезпечені шляхом спалювання газоподібного або рідинного палива у паливоспалювальних пристроях, з подальшим змішуванням продуктів їх згоряння з атмосферним повітрям у змішувальній камері (див. рис. 1.1).

Тому наступним етапом розрахункового завдання є розрахунок процесу горіння заданого виду палива з метою визначення теплотворності, кількості атмосферного повітря, необхідного для горіння, об'ємів та складу продуктів згоряння. Отримані дані стануть в нагоді для подальшого теплового розрахунку процесу сушіння у барабанній сушарці.

Для виконання розрахунку з табл. 3.1 обирають вид палива, для якого проводять перерахунки наданої маси палива на робочу масу. Наданий і перерахований склад газового або рідинного палива наводять у вигляді табл. 3.2. Склад розрахованих мас палива вказують з точністю  $\pm 0,01 \%$ .

Таблиця 3.1 – Склади деяких видів палива

Природні гази								
Найменування газу	Склад сухого газу, %							
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Шебелинський (Україна)	93,2	4,4	0,8	0,6	0,3	0,1	0,6	–
Юліївський (Україна)	98,0	0,3	0,1	0,1	–	0,3	1,2	–
Газлинський (Узбекистан)	95,6	2,7	0,3	0,3	–	0,1	1,0	–
Дашавський (Україна)	97,9	0,5	0,2	0,1	–	0,1	1,2	–
Яблунівський (Україна)	94,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3,3	–
Опішнянський (Україна)	85,9	3,1	1,0	0,4	0,1	0,1	9,4	–
Рідинне паливо								
Найменування палива	Вміст компонентів, %							
	C <sup>r</sup>	H <sup>r</sup>	S <sup>r</sup>	O <sup>r</sup> +N <sup>r</sup>	A <sup>p</sup>	W <sup>p</sup>		
Мазут малосірчистий:								
ММ 20	87,2	11,7	0,5	0,6	0,1	2,0		
ММ 40	87,4	11,2	0,5	0,9	0,2	3,0		
ММ 60	87,6	10,7	0,7	1,0	0,2	3,0		
ММ 80	87,6	10,5	0,9	1,0	0,3	4,0		
Мазут сірчистий :								
МС 10	85,2	11,6	2,5	0,7	0,1	1,0		
МС 20	85,0	11,6	2,9	0,5	0,2	2,0		
МС 40	85,0	11,4	3,2	0,4	0,3	3,0		

Перерахунки складу газового палива з сухої маси на робочу виконують за формулою (3.1), об'єм. %:

$$C_m H_n^p = \frac{C_m H_n^c \cdot (100 - H_2O^p)}{100}, \quad (3.1)$$

де  $C_m H_n^p$ ,  $C_m H_n^c$  – кількість відповідного компонента газового палива у робочій і сухій масі, об'єм. %;  $H_2O^p$  – кількість водяної пари у робочій масі газового палива, об'єм. %, яка для перерахунків обирається довільно, проте не повинна перевищувати 2 %. Аналогічним чином мають бути перераховані й неорганічні компоненти (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub> та інші) газового палива.

Перерахунки складу рідинного палива з горючої маси на робочу виконують за формулою (3.2), мас. %:

$$C^P = C^G \cdot \frac{100 - (A^P + W^P)}{100}, \quad (3.2)$$

де  $C^P$ ,  $C^G$  – кількість вуглецю у робочій і горючій масі мазуту, мас. %;  $A^P$ ,  $W^P$  – кількість золи та вологи у робочій масі, мас. % (див. табл. 3.1). Аналогічним чином перераховують усі інші компоненти горючої маси мазуту.

Таблиця 3.2 – Наданий та перерахований склад палива

Найменування компонентів палива		Кількість компонентів, мас. або об'єм. %	
газового палива	рідинного палива	в сухій масі газу або горючій масі мазуту	в робочій масі палива
CH <sub>4</sub>	C		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	H		
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	O		
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N		
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	S		
CO <sub>2</sub>	A		
N <sub>2</sub>	W		
H <sub>2</sub> S			
H <sub>2</sub> O			
Всього:		100 %	100 %

Нижчу теплоту згоряння (теплотворність) рідинного палива розраховують за формулою Д. І. Менделєєва (3.3), кДж/кг:

$$Q_H^P = 339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S^P) - 25 \cdot W^P. \quad (3.3)$$

Нижчу теплоту згоряння газового палива розраховують за формулою (3.4), кДж/м<sup>3</sup>:

$$Q_H^P = 358 \cdot CH_4^P + 234 \cdot H_2S^P + 638 \cdot C_2H_6^P + 913 \cdot C_3H_8^P + 1187 \cdot C_4H_{10}^P + 1461 \cdot C_5H_{12}^P. \quad (3.4)$$

Теоретичну витрату сухого повітря для горіння 1 м<sup>3</sup> газового палива розраховують за формулою (3.5), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$L_0 = 4,76 \cdot 10^{-2} \cdot \left[ 1,5 \cdot H_2S^P + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n^P \right]. \quad (3.5)$$

Теоретичну витрату сухого повітря для горіння 1 кг рідинного палива розраховують за формулою (3.6), м<sup>3</sup>/кг:

$$L_0 = 0,0889 \cdot C^P + 0,265 \cdot H^P - 0,0333 \cdot (O^P - S^P). \quad (3.6)$$

Теоретичну витрату вологого повітря для горіння 1 м<sup>3</sup> газового палива або 1 кг рідинного палива розраховують за формулою (3.7), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, (м<sup>3</sup>/кг):

$$L_0^{\text{БОЛ}} = (1 + 1,61 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{ПОВ}}) \cdot L_0, \quad (3.7)$$

де  $d_{\text{ПОВ}}$  – вологовміст атмосферного повітря, г/кг сухого повітря; у розрахунках значення  $d_{\text{ПОВ}}$  обирають у межах 9–11 г/кг сухого повітря.

Дійсні витрати сухого ( $L_\alpha$ ) і вологого ( $L_\alpha^{\text{БОЛ}}$ ) повітря для горіння 1 м<sup>3</sup> газового палива або 1 кг рідинного палива розраховують за формулами (3.8) та (3.9), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, (м<sup>3</sup>/кг):

$$L_\alpha = \alpha \cdot L_0; \quad (3.8)$$

$$L_\alpha^{\text{БОЛ}} = \alpha \cdot L_0^{\text{БОЛ}}. \quad (3.9)$$

У розрахунках зазвичай значення коефіцієнта витрати повітря  $\alpha$  обирають у межах 1,2–1,4.

Об'єми продуктів згорання газового палива визначаються за формулами (3.10)–(3.14), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot [CO^P + CO_2^P + \sum (m \cdot C_m H_n^P)]; \quad (3.10)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,01 \cdot H_2 S^P; \quad (3.11)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L_\alpha + 0,01 \cdot N_2^P; \quad (3.12)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0; \quad (3.13)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \cdot [H_2 S^P + \sum (\frac{n}{2} \cdot C_m H_n^P) + H_2 O^P + 0,16 \cdot d_{\text{ПОВ}} \cdot L_\alpha]. \quad (3.14)$$

Об'єми продуктів згорання рідинного палива визначаються за формулами (3.15)–(3.18), об'єм O<sub>2</sub> для всіх видів палива визначається за формулою (3.13), м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866 \cdot C^P; \quad (3.15)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S^{\text{P}}; \quad (3.16)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L_{\alpha} + 0,008 \cdot N^{\text{P}}; \quad (3.17)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0016 \cdot d_{\text{пов}} \cdot L_{\alpha} + 0,112 \cdot H^{\text{P}} + 0,0124 \cdot (W^{\text{P}} + 100 \cdot G_{\text{ф}}), \quad (3.18)$$

де  $G_{\text{ф}}$  – витрата водяної пари на розпилювання мазуту, кг пари/кг мазуту, в розрахунках  $G_{\text{ф}}$  зазвичай обирають в межах 0,25–0,35 кг/кг, але якщо розпилювання мазуту відбувається за допомогою повітря,  $G_{\text{ф}} = 0$ .

Загальний об'єм продуктів повного згоряння палива визначається за формулою (3.19),  $\text{м}^3/\text{м}^3$  або  $\text{м}^3/\text{кг}$ :

$$V_{\alpha} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (3.19)$$

Склад продуктів повного згоряння палива визначається за формулою (3.20), %:

$$x_i = \frac{V_{x_i} \cdot 100}{V_{\alpha}}, \quad (3.20)$$

де  $x_i$  – вміст  $i$ -го газу в продуктах згоряння ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$ ), %;  $V_{x_i}$  – питомий об'єм, що займає  $i$ -й газ у продуктах згоряння ( $V_{\text{CO}_2}$ ,  $V_{\text{SO}_2}$ ,  $V_{\text{N}_2}$ ,  $V_{\text{O}_2}$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}}$ ),  $\text{м}^3/\text{м}^3$  або  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

Склад і об'єми продуктів повного згоряння палива вказують у вигляді табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Склад і об'єми продуктів згоряння палива

Найменування компонентів	Кількість компонентів у продуктах згоряння	
	в одиницях об'єму, $\text{м}^3/\text{м}^3$ або $\text{м}^3/\text{кг}$	у відсотках, %
$\text{CO}_2$		
$\text{SO}_2$		
$\text{N}_2$		
$\text{O}_2$		
$\text{H}_2\text{O}$		
Усього:	$V_{\alpha}$	100

#### 4. Тепловий розрахунок барабанної сушарки

Метою теплового розрахунку є визначення витрат тепла та сушильного агента, а також витрати палива для процесу сушіння заданого матеріалу. Починати тепловий розрахунок слід з побудування на  $I - d$  діаграмі теоретичного процесу сушіння. Для цього необхідно знайти на діаграмі точку, від якої починається теоретичний процес. Для її знаходження треба знати початкові параметри процесу сушіння (параметри суміші димових газів з повітрям)  $d_{\text{поч}}$  та  $t_{\text{поч}}$ .

Початковий вологовміст  $d_{\text{поч}}$  суміші димових газів з повітрям визначають за допомогою розрахунків процесу горіння наданого виду палива, наведених у розділі 3 за формулою (4.1), г/кг сухих газів:

$$d_{\text{поч}} = \frac{804 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}}{1,964 \cdot V_{\text{CO}_2} + 1,25 \cdot V_{\text{N}_2} + 1,428 \cdot V_{\text{O}_2}}. \quad (4.1)$$

У наведеному прикладі для утворення суміші димових газів з повітрям приймають, що у топці (див. рис. 1.1) спалюється мазут малосірчистий марки ММ40, склад якого наведений у табл. 3.1. Після проведення розрахунків процесу горіння мазуту за наведеними вище у розділі 3 формулами, обирають такі параметри:

- теплотворність мазуту  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 39\,739$  кДж/кг;
- теоретична витрата сухого повітря для горіння  $L_0 = 10,40$  м<sup>3</sup>/кг;
- теоретична витрата атмосферного повітря:  $L_0^{\text{БОЛ}} = 10,57$  м<sup>3</sup>/кг;
- дійсна витрата атмосферного повітря за  $\alpha = 1,2$   $L_{\alpha}^{\text{БОЛ}} = 12,68$  м<sup>3</sup>/кг;
- склад та об'єми продуктів згоряння за  $\alpha = 1,2$ , у %: CO<sub>2</sub> – 11,8; N<sub>2</sub> – 74,1; O<sub>2</sub> – 3,3; H<sub>2</sub>O – 10,8; у м<sup>3</sup>/кг: CO<sub>2</sub> – 1,573; N<sub>2</sub> – 9,862; O<sub>2</sub> – 0,437; H<sub>2</sub>O – 1,477.

Далі необхідно розрахувати загальний тепловміст (ентальпію) продуктів згоряння при спалюванні мазуту з атмосферним повітрям (без урахування підігріву мазуту та повітря) за  $\alpha = 1,2$ , за формулою:

$$I_{\text{заг}} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{V_{\alpha}} = \frac{39739}{13,35} = 2\,977 \text{ кДж/м}^3.$$

Як відомо, початкова температура газів на вході до сушильного барабана  $t_{\text{поч}} = 800$  °С. Для отримання такої температури димові гази, утворені при згорянні мазуту, необхідно розбавити атмосферним повітрям у потрібній кількості.

Для визначення кількості атмосферного повітря, необхідного для змішування, має бути складене рівняння теплового балансу, в якому кількість повітря за температури  $t_{\text{пов}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  для змішування позначають  $x$  ( $\text{м}^3/\text{кг}$  палива).

$$I_{\text{заг}} \cdot \eta + \frac{L_{\alpha}^{\text{вол}} + x}{V_{\alpha}} \cdot I_{20}^{\text{пов}} = I_{800}^{\text{д.г}} + \frac{x}{V_{\alpha}} \cdot I_{800}^{\text{пов}},$$

де  $I_{20}^{\text{пов}} = c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} = 1,2971 \cdot 20 = 26 \text{ кДж/м}^3$  – ентальпія повітря за температури  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $I_{800}^{\text{пов}} = 1110,0 \text{ кДж/м}^3$  – ентальпія повітря за початкової температури  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , яка наведена у табл. 4.1;  $I_{800}^{\text{д.г}}$  – ентальпія димових газів за температури  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , розраховується за формулою:

$$I_{800}^{\text{д.г}} = 0,01 \cdot \sum (I_{y_i} \cdot y_i) = 0,01 \cdot (1704,9 \cdot 11,8 + 1093,6 \cdot 74,1 + 1159,8 \cdot 3,3 + 1334,4 \cdot 10,8) = 1\,193,9 \text{ кДж/м}^3,$$

де  $I_{y_i}$  – ентальпії продуктів згоряння мазуту  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$  за температури  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{кДж/м}^3$  (див. табл. 4.1);  $y_i$  – відсотковий склад продуктів згоряння мазуту взятий з прикладу (для розрахунку беруть з табл. 3.3), %;  $\eta$  – ККД топки, у розрахунках приймають  $\eta = 0,8\text{--}0,9$ .

Отримують числовий запис рівняння теплового балансу:

$$2\,977 \cdot 0,9 + \frac{12,68 + x}{13,35} \cdot 26 = 1\,193,9 + \frac{x}{13,35} \cdot 1\,110.$$

Розв'язавши рівняння теплового балансу, отримують кількість атмосферного повітря, необхідного для змішування  $x = 18,59 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Розраховують загальну кількість повітря, що витрачається на горіння та розбавлення димових газів:

$$L_{\alpha}^{\text{заг}} = L_{\alpha}^{\text{вол}} + x = 12,68 + 18,59 = 31,27 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тоді загальний коефіцієнт витрати повітря становитиме:

$$\alpha_{\text{заг}} = \frac{L_{\alpha}^{\text{заг}}}{L_0^{\text{вл}}} = \frac{31,27}{10,57} = 2,96.$$

Таблиця 4.1 – Ентальпія повітря та деяких газів, кДж/м<sup>3</sup>

Температура, °С	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Сухе повітря	Вологе повітря, $d_{\text{пов}} = 10 \text{ г/кг сух. пов.}$
100	170,0	181,3	150,7	129,8	131,9	164,1	249,5	350,9	470,6	583,7	130,05	130,2
200	357,6	377,7	304,4	260,0	267,1	351,7	554,8	793,0	1051,4	1303,0	261,52	262,1
300	558,9	586,6	462,7	391,9	407,0	566,1	913,2	1310,9	1731,7	2140,8	395,31	397,3
400	772,1	807,2	626,4	526,7	551,0	806,4	1323,5	1903,8	2506,8	3096,3	531,76	535,9
500	994,4	1034,2	795,1	664,1	699,2	1070,2	1776,5	2546,9	3344,6	4128,4	671,4	671,8
600	1224,7	1268,7	968,9	804,3	850,0	1356,6	2266,8	3259,2	4269,1	5269,8	814,2	816,5
700	1462,1	1506,5	1148,9	947,5	1004,0	1663,9	2790,6	4006,5	5239,6	6462,2	959,84	963,0
800	1704,9	1745,1	1334,4	1093,6	1159,8	1995,5	3345,0	4790,8	6246,6	7700,3	1107,68	1110,0
900	1952,4	1993,4	1526,2	1241,9	1318,1	2342,2	3925,7	5608,5	7303,0	8992,8	1257,84	1262,4
1000	2203,6	2235,9	1722,9	1391,7	1477,6	2699,4	4529,5	6461,4	8404,1	10344,8	1409,8	1416,5
1100	2458,6	2487,1	1925,2	1543,7	1638,4	3065,3	5152,5	7345,7	9546,8	11747,5	1564,09	1568,0
1200	2716,5	2733,3	2132,4	1697,4	1800,8	3435,8	5790,6	8258,0	10726,3	13196,2	1719,36	1728,4
1300	2976,9	2970,5	2343,9	1852,7	1963,7	—	—	—	—	—	1876,81	1882,5
1400	3239,1	3241	2559,1	2008,9	2128,2	—	—	—	—	—	2035,18	2041,2
1500	3503,3	3495	2779,3	2166,3	2294,5	—	—	—	—	—	2194,35	2200,3
1600	3769,1	3747	3002,1	2324,6	2460,7	—	—	—	—	—	2354,72	2363,6
1700	4036,7	3995	3229,4	2484,1	2628,6	—	—	—	—	—	2515,49	2523,1
1800	4305,1	4244	3458,5	2643,7	2797,7	—	—	—	—	—	2676,96	2689,7
1900	4574,3	4489,7	3690,4	2804,4	2967,3	—	—	—	—	—	2840,12	2849,2
2000	4844,4	4740	3925,7	2965,2	3138,6	—	—	—	—	—	3003	3010,9
2100	5115,7	4989,6	4163,5	3127,7	3309,4	—	—	—	—	—	3167,22	3175,5
2200	5387,0	5238,2	4402,2	3289,3	3482,7	—	—	—	—	—	3330,8	3339,1

Після цього за нового значення  $\alpha = 2,96$  перераховують об'єм водяної пари  $V_{H_2O}$ , який збільшується за рахунок додаткового введення водяної пари з атмосферним повітрям;  $V_{N_2}$  та  $V_{O_2}$ , які залежать від коефіцієнта витрати повітря. Об'єм  $V_{CO_2}$  не залежить від коефіцієнта витрати повітря, тому перераховувати його не потрібно. Перерахунок відповідних об'ємів проводять за формулами (3.13), (3.17) та (3.18), у яких дійсна витрата сухого повітря  $L_\alpha$  за формулою (3.8) має вигляд добутку:  $\alpha_{заг} \cdot L_0$ . Вміст водню  $H^p$ , азоту  $N^p$  та вологи  $W^p$  у робочій масі мазуту ММ40 беруть з табл. 3.2 після перерахунку. Крім того, припускають, що розпилення мазуту відбувається підігрітим повітрям, що не потребує витрати пари, тобто  $G_\phi = 0$ .

$$V_{H_2O} = 0,0016 \cdot 10 \cdot 2,96 \cdot 10,4 + 0,112 \cdot 10,8 + 0,0124 \cdot 3 = 1,74 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot 2,96 \cdot 10,4 + 0,008 \cdot 0,435 = 24,32 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (2,96 - 1) \cdot 10,4 = 4,28 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тоді вологовміст димових газів, розбавлених атмосферним повітрям, тобто початковий вологовміст  $d_{поч}$ , за формулою (4.1) складатиме:

$$d_{поч} = \frac{804 \cdot 1,74}{1,964 \cdot 1,573 + 1,25 \cdot 24,32 + 1,428 \cdot 4,28} = 35,3 \text{ г/кг сухих газів}.$$

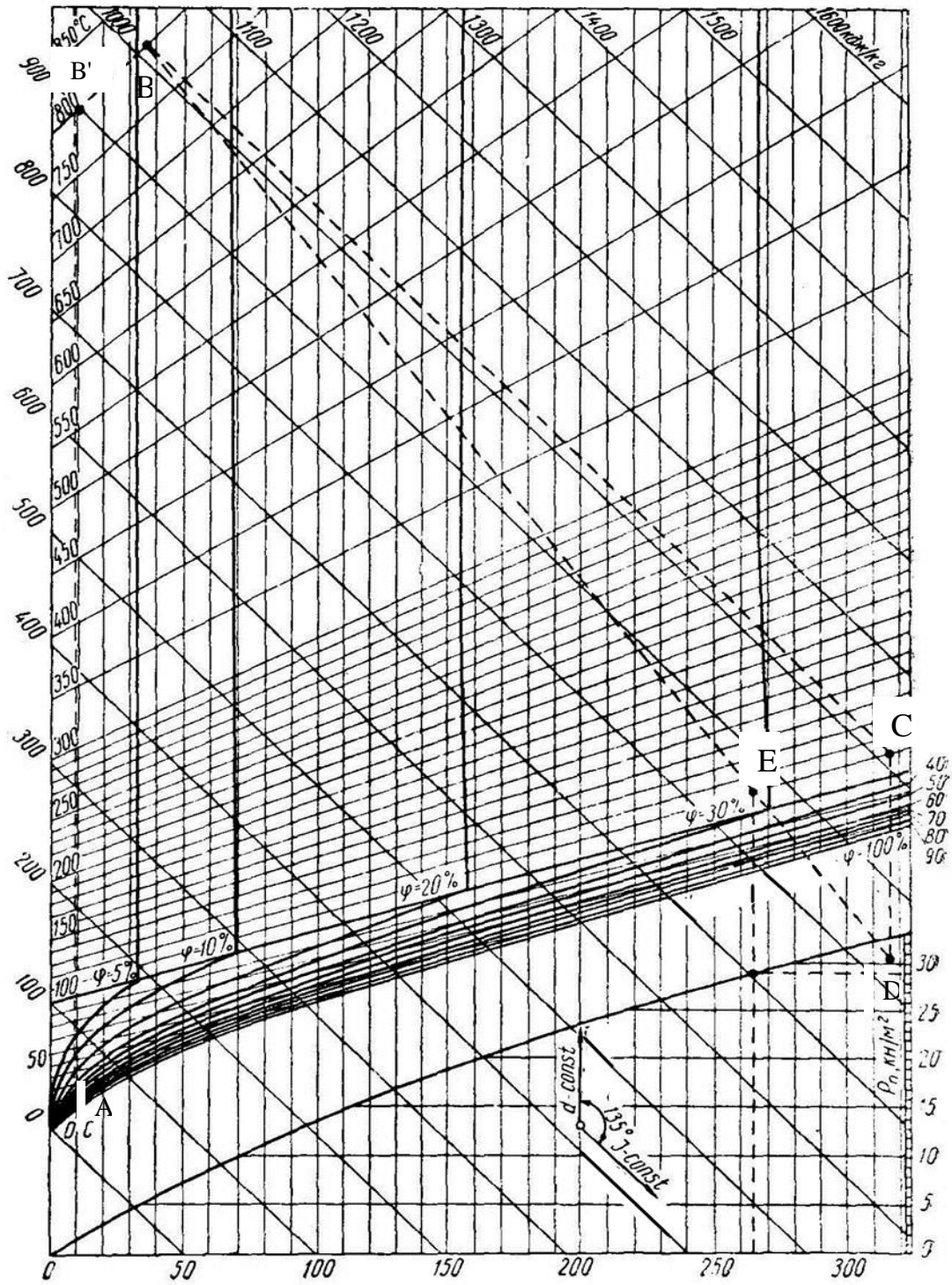
Далі за відомими початковими параметрами сушильного агента  $t_{поч} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $d_{поч} = 35,3 \text{ г/кг сухих газів}$ , на  $I - d$  діаграмі знаходять точку В – початок теоретичного процесу сушіння, як показано на рис. 4.1.

Для побудови теоретичного процесу сушіння з точки В лінією постійного тепловмісту проводять пряму до перетину з лінією кінцевої температури газів  $t_k = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  та отримують точку С. Параметрами точки С є: початковий тепловміст  $I_{поч} = 1020 \text{ кДж/кг сухих газів}$  та кінцевий вологовміст теоретичного процесу сушіння  $d_k^{теор} = 317 \text{ г/кг сухих газів}$ .

Витрату сухих газів для теоретичного процесу сушіння визначають за формулою (4.2), кг сухих газів/год:

$$G_{газ}^{теор} = \frac{1000 \cdot n}{d_k^{теор} - d_{поч}}. \quad (4.2)$$

Температура, °С; Тепловміст,  $I$ , кДж/кг сухих газів



Вміст вологи,  $d$ , г/кг сухих газів

Рис. 4.1. Побудова на  $I - d$  діаграмі процесу сушіння сумішшю димових газів з повітрям

Кількість вологи, що випаровується з глини  $n = 1750$  кг/год, була визначена за формулою (2.2) у розділі 2. Тоді витрата сухих газів для теоретичного процесу сушіння становитиме:

$$G_{\text{газ}}^{\text{теор}} = \frac{1000 \cdot 1750}{317 - 35,3} = 6\,212 \text{ кг сухих газів/год.}$$

Дійсний процес сушіння буде супроводжуватись втратами тепло-вмісту сушильного агента, які обумовлені витратою тепла у барабанній сушарці на нагрів матеріалу, що висушується, а також втратою тепла у навколишнє середовище через стінки сушильного барабана, кДж/год:

$$q_{\text{втр}} = q_{\text{м}} + q_{\text{нс}}.$$

Витрата тепла на нагрів глини, що висушується, була розрахована за формулою (2.6) у розділі 2,  $q_{\text{м}} = 894\,400$  кДж/год.

Втрата тепла крізь стінки сушарки у навколишнє середовище розраховується за формулою (4.3), кДж/год:

$$q_{\text{нс}} = \frac{3,6 \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нс}})}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \left( \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) + 0,07} \cdot F, \quad (4.3)$$

де  $t_{\text{вн}}$ ,  $t_{\text{нс}}$  – середні температури внутрішньої поверхні сушильної камери та навколишнього середовища (повітря), °С;  $F$  – поверхня тепловіддачі стінок сушарки, м<sup>2</sup>;  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі від газів (сушильного агента) на стінки сушарки, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\delta$  – товщина стінок сушарки, м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності стінок сушарки, Вт/(м·°С), якщо стінки сушарки багат шарові з різних матеріалів, відношення  $\delta/\lambda$  для кожного шару сумують.

Для розрахунку втрати тепла крізь стінки сушильного барабана у навколишнє середовище приймають: середню температуру внутрішньої поверхні сушильної камери, яка у цьому випадку відповідає середній температурі газів всередині барабана і була розрахована за формулою (2.4) у розділі 2,  $t_{\text{вн}} = 272$  °С; середню температуру навколишнього середовища  $t_{\text{нс}} = t_{\text{пов}} = 20$  °С; поверхню тепловіддачі стінок барабана розраховують як площу циліндричної поверхні за обраними у розділі 2 розмірами барабана  $D_6 = 1,8$  м та  $L = 12$  м:  $F = \pi \cdot D_6 \cdot L = 67,8$  м<sup>2</sup>; коефіцієнт тепловіддачі від газів на стінки сушарки  $\alpha_1 = 100$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Крім того, приймають, що сталевий корпус барабана завтовшки 0,012 м (згідно з табл. 1.1) з коефіцієнтом теплопровідності 58 Вт/(м·°С),

теплоізолюваний діатомітом завтовшки 0,03 м. Коефіцієнт теплопровідності діатомітового шару густиною 750 кг/м<sup>3</sup>, розрахований за середніх температур 150–170 °С за рівнянням  $\lambda_t = 0,17 + 0,00035 \cdot t$ , приблизно дорівнює 0,20 Вт/(м·°С).

Тоді за формулою (4.3) втрата тепла крізь стінки сушильного барабана у навколишнє середовище становитиме:

$$q_{\text{нс}} = \frac{3,6 \cdot (272 - 20) \cdot 67,8}{\frac{1}{100} + \frac{0,012}{58} + \frac{0,03}{0,20} + 0,07} = 267\,186 \text{ кДж/год.}$$

У такому випадку сума втрат тепла у сушарці буде дорівнювати:

$$q_{\text{втр}} = 894400 + 267186 = 1\,161\,586 \text{ кДж/год.}$$

Після цього знаходять величину зменшення тепловмісту сушильного агента наприкінці теоретичного процесу сушіння (відносно точки С) за формулою:

$$I_{\text{втр}} = \frac{q_{\text{втр}}}{G_{\text{газ}}^{\text{теор}}} = \frac{1161586}{6212} = 187 \text{ кДж/кг сухих газів.}$$

На  $I - d$  діаграмі відкладають величину  $I_{\text{втр}}$  від точки С донизу та одержують допоміжну точку D (див. рис. 4.1). Поєднують точки В і D та у місці перетину прямої BD з лінією кінцевої температури процесу сушіння  $t_k = 110$  °С, знаходять на діаграмі точку Е. Дійсний процес сушіння зображують прямою BE.

Далі за допомогою ординати з точки Е знаходять величину кінцевого вологовмісту  $d_k = 265$  г/кг сухих газів, і за формулою (4.2) визначають дійсну витрату газів (суміші димових газів з повітрям) для сушіння:

$$G_{\text{газ}} = \frac{1000 \cdot 1750}{265 - 35,3} = 7619 \text{ кг сухих газів/год.}$$

Витрату тепла для сушіння знаходять за формулою (4.4), кДж/год:

$$Q = G_{\text{газ}} \cdot (I'_{\text{поч}} - I_{\text{пов}}) - 4,2 \cdot n \cdot t_m. \quad (4.4)$$

Для визначення витрати тепла для сушіння за  $I - d$  діаграмою (див. рис. 4.1) знаходять  $I'_{\text{поч}} = 898$  кДж/кг сухого повітря – початковий тепловміст підігрітого димовими газами до 800 °С повітря (для точки В'), та

$I_{\text{пов}} = 38$  кДж/кг сухого повітря – початковий тепловміст холодного повітря, отриманий згідно з початковими параметрами атмосферного повітря:  $\varphi_{\text{пов}} = 70\%$ ,  $t_{\text{пов}} = 20$  °С (для точки А);  $t_m$  – температуру глини прийняли  $10$  °С.

Тоді витрата тепла для сушіння за формулою (4.4) становитиме:

$$Q = 7619 \cdot (898 - 38) - 4,2 \cdot 1750 \cdot 10 = 6\,478\,840 \text{ кДж/год.}$$

Витрату мазуту за його нижчої теплоти згоряння  $Q_H^p = 39\,739$  кДж/кг з урахуванням коефіцієнта корисної дії топки  $\eta = 0,9$ , розраховують за формулою:

$$X_{\text{п}} = \frac{Q}{Q_H^p \cdot \eta} = \frac{6478840}{39739 \cdot 0,9} = 181 \text{ кг/год.}$$

Питому витрату тепла для сушіння, віднесено до  $1$  кг випареної вологи, розраховують за формулою:

$$q_w = \frac{X_{\text{п}} \cdot Q_H^p}{n} = \frac{181 \cdot 39739}{1750} = 4\,110 \text{ кДж/кг вологи.}$$

Далі можна визначити витрату повітря, необхідного для горіння:

$$V_{\text{пов}} = L_{\alpha}^{\text{вол}} \cdot X_{\text{п}} = 12,68 \cdot 181 = 2\,295 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Витрата повітря, необхідного для розбавлення димових газів у камері змішування, становитиме:

$$V'_{\text{пов}} = \alpha_{\text{заг}} \cdot L_0^{\text{вол}} \cdot X_{\text{п}} - V_{\text{пов}} = 2,96 \cdot 10,57 \cdot 181 - 2295 = 3\,368 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Об'єм відхідних газів, що залишають барабан, розраховують за формулою (4.5), м<sup>3</sup>/год:

$$V_{\text{см}} = \frac{G_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}}}, \quad (4.5)$$

де  $G_{\text{см}}$  – кількість газів, що залишають барабан, кг/год;  $\rho_{\text{см}}$  – густина відхідних газів за  $t_{\text{відх}} = 110$  °С, кг/м<sup>3</sup>.

Кількість газів, що залишають барабан, розраховують за формулою:

$$G_{\text{см}} = (1 + 0,001 \cdot d_{\text{поч}}) \cdot G_{\text{газ}} + n = (1 + 0,001 \cdot 35,3) \cdot 7619 + 1750 = 9\,638 \text{ кг/год.}$$

Густина відхідних газів за  $t_{\text{відх}} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  розраховують за формулою (4.6),  $\text{кг/м}^3$ :

$$\rho_{\text{см}} = \frac{353 - 0,0013 \cdot p_{\text{п}}}{T}, \quad (4.6)$$

де  $p_{\text{п}}$  – парціальний тиск водяної пари у відхідних газах,  $\text{Н/м}^2$ ;  $T$  – температура газів,  $\text{К}$ .

Парціальний тиск водяної пари у відхідних газах визначають за допомогою  $I - d$  діаграми. За кінцевих параметрів  $d_{\text{к}} = 265 \text{ г/кг}$  сухих газів та  $t_{\text{к}} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , з точки Е проводять ординату до перетину з лінією парціальних тисків. У точці перетину, за шкалою парціальних тисків знаходять  $p_{\text{п}} = 29\,000 \text{ Н/м}^2$  (пунктирні лінії на рис. 4.1).

Тоді за формулою (4.6) густина відхідних газів становитиме:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{353 - 0,0013 \cdot 29000}{273 + 110} = 0,823 \text{ кг/м}^3.$$

Дійсний об'єм вологих газів, що залишають барабан, за кінцевих параметрів, визначають за формулою (4.5):

$$V_{\text{см}} = \frac{9638}{0,823} = 11\,711 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Швидкість газів, що залишають барабан, розраховують за формулою (2.9), приймаючи  $\beta = 0,2$ :

$$v_{\text{газ}} = \frac{4 \cdot 11\,711}{3600 \cdot 3,14 \cdot 1,8^2 \cdot (1 - 0,2)} = 1,6 \text{ м/с}.$$

### Варіанти розрахункових завдань

Відповідно до отриманого з табл. 4.2 варіанта завдання, за допомогою табл. 1.1 та 1.2 визначте основні розміри барабанної сушарки, після чого для заданого виду палива (див. табл. 3.1) проведіть розрахунки параметрів процесу горіння за допомогою яких виконайте тепловий розрахунок барабанної сушарки, а саме: побудуйте з використанням  $I - d$  діаграми на рис. 4.1 теоретичний та дійсний процеси сушіння, розрахуйте витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу.

Проводити необхідні розрахунки основних розмірів сушарки, процесу горіння палива, а також теплові розрахунки можна з використанням засобів програмування, на кшталт, Excel.exe (ОС Windows).

Таблиця 4.2 – Параметри процесу сушіння сумішшю димових газів з атмосферним повітрям деяких матеріалів

Номер варіанта	Найменування матеріалу	Параметри сушіння							
		$t_{пов},$ °C	$\varphi_{пов},$ %	$t_{поч},$ °C	$t_{к},$ °C	$w_{поч},$ %	$w_{к},$ %	$P_c,$ кг/год	$\eta$
1	Глина	17	72	600	80	20	4	8000	0,9
2	Глина	18	70	700	90	23	5	9000	0,85
3	Вогнетривка глина	19	70	800	80	10	1	8000	0,85
4	Шлак доменний	20	65	600	100	20	0,3	9500	0,8
5	Вогнетривка глина	21	65	800	75	9	0,5	8500	0,85
6	Шлак доменний	22	60	750	110	20	1	10000	0,9
7	Вапняк	23	55	800	110	10	0,8	9000	0,85
8	Каолін	20	65	800	100	30	2	8000	0,9
9	Каолін	21	65	800	90	25	1	8500	0,9
10	Пісок	25	45	800	100	10	0,3	9500	0,8
11	Крейда	19	65	800	100	12	1	9000	0,85
12	Антрацит	25	47	380	150	14	5	10000	0,8

## Список літератури

1. Гинзбург Д. Б. Печи и сушилки силикатной промышленности / Д. Б. Гинзбург, С. Н. Деликишткин, Е. И. Ходоров; под ред. П. П. Будникова. – М.: Стройиздат, 1963. – 343 с.
2. Левченко П. В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности / П. В. Левченко. – М.: Высшая школа, 1968. – 366 с.
3. Роговой М. И. Расчеты и задачи по теплотехническому оборудованию предприятий промышленности строительных материалов : учебник для вузов. / М. И. Роговой, М. Н. Кондакова, М. Н. Сагановский. – М.: Стройиздат, 1975. – 320 с.
4. Булавин И. А. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов : учебник для вузов / И. А. Булавин, И. А. Макаров, А. Я. Рапопорт, В. К. Хохлов. – М.: Стройиздат, 1982. – 243 с.
5. Перегудов В. В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей : учебник для вузов / В. В. Перегудов, М. И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1983. – 416 с.
6. Кошкарёв В. Н. Тепловые установки : учебник / В. Н. Кошкарёв, А. А. Кучеренко. – Киев: Вища школа, 1990.
7. Ралко А. В. Теплотехника, тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов / А. В. Ралко, А. А. Крупа, Н. Н. Племянников. – Киев: УМК ВО, 1993. – 396 с.
8. Драганов Б. Х. Теплотехніка / Б. Х. Драганов, А. А. Долинський, А. В. Мінденко, К. М. Письмений. – Київ: Вища школа, 2005.
9. Бордюженко О. М. Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання: Ч. 2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Тепло-ва обробка виробів з бетону і залізобетону : навч. посіб. / О. М. Бордюженко. – Рівне: НУВГП, 2010.
10. Кошельник В. М. Основи проектування теплотехнічних установок підприємств промисловості будівельних матеріалів : навч. посіб. / В. М. Кошельник, Ю. В. Шульгін, О. В. Кошельник, В. В. Соловей. – Харків: НТУ «ХП», 2010.
11. Гоц В. І. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів / В. І. Гоц, В. М. Кошкарёв, В. В. Павлюк, С. А. Тимошенко. – Київ: Основа, 2014. – 472 с.
12. Сардак Е. М. Теплові процеси і агрегати в технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів : навч. посіб. / Е. М. Сардак, В. І. Голеус, О. В. Зайчук. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 248 с.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Характеристика барабанних сушарок для сушіння кускових сипучих матеріалів.....	3
2. Розрахунок розмірів сушильного барабана.....	6
3. Розрахунок горіння палива.....	11
4. Тепловий розрахунок барабанної сушарки.....	16
Варіанти розрахункових завдань.....	24
Список літератури.....	26

Навчальне видання

Методичні вказівки  
до виконання розрахункового завдання «Розрахунок основних  
розмірів та параметрів роботи барабанної сушарки» з курсу  
«Механічне обладнання підприємств» для студентів спеціальності  
161 «Хімічні технології та інженерія»  
освітньої програми «Хімічні технології тугоплавких неметалевих і  
силікатних матеріалів» усіх форм навчання

Укладач    НАГОРНИЙ Андрій Олегович

Роботу до видання рекомендувала *проф. Штефан В. В.*

Відповідальний за випуск *проф. Пітак Я. М.*

Редактор *О. І. Шпільова*

План 2020 р., поз. 145

Підп. до друку 25.09.2020 р. Формат 60 x 84 <sup>1/16</sup>. Ум. друк. арк. 1,8.  
Гарнітура Times New Roman.

---

Видавничий центр НТУ «ХП»  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.  
61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

---

Самостійне електронне видання