

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»

2353

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
з вивчення курсу
«Процеси та апарати хімічної технології»
для студентів III-IV курсів усіх спеціальностей
(Розділ «Сушіння»)

Затверджено на засіданні кафедри
процесів та апаратів хімічної
технології.
Протокол № 12 від 27.05.11.

Методичні вказівки з вивчення курсу “Процеси та апарати хімічної технології” (розділ «Сушіння») для студентів III-IV курсів усіх спеціальностей / Укл.: А.О. Біла, П.В. Рябик, П.Г. Сорока. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2012. – 30 с.

Укладачі: А.О. Біла
П.В. Рябик, канд. техн. наук
П.Г. Сорока, доктор техн. наук

Відповідальний за випуск П.Г. Сорока, доктор техн. наук

Конспект лекцій відповідає програмі курсу «Процеси та апарати хімічної технології» і містить основні закономірності процесів сушіння. Критично розглянуто варіанти процесів сушіння та конструкції сушарок, наведено рекомендації щодо їх вибору та розрахунку.

Навчальне видання

Методичні вказівки з вивчення курсу “Процеси та апарати хімічної технології” (розділ «Сушіння») для студентів III-IV курсів усіх спеціальностей

Укладачі: БІЛА Анна Олександрівна
РЯБИК Павло Васильович
СОРОКА Петро Гнатович

Авторська правка

Підписано до друку 01.11.12. Формат 60 x 84 1/16. Папір ксерокс. Друк різнограф. Умовн.-друк. арк. 1,32. Облік.-вид. арк. 1,4. Тираж 50 прим. Зам. № 20. Свідоцтво ДК № 303 від 27.12.2000.

ДВНЗ УДХТУ, 49005, Дніпропетровськ–5, пр. Гагаріна, 8.

Видавничо-поліграфічний комплекс ІнКомЦентру

ЗМІСТ

	Стр.
1. Загальні відомості.....	4
2. Властивості вологого газу.....	5
3. Вологість матеріалу.....	8
4. Форми зв'язку вологи з матеріалом.....	9
5. Рівновага в процесі сушіння.....	9
6. Матеріальний баланс конвекційної сушарки.....	10
7. Тепловий баланс конвекційної сушарки.....	12
8. Визначення витрат повітря та тепла на сушіння.....	14
9. Швидкість сушіння.....	16
10. Тривалість сушіння.....	17
11. Варіанти сушіння.....	19
12. Конвекційні сушарки.....	24
Список літератури.....	30

1. Загальні відомості

Сушінням називається процес вилучання вологи з твердих та пастоподібних матеріалів шляхом підводу теплоти та відводу парів що утворюються.

Сушінням користуються, як на стадії підготовки сировини до хімічної реакції з метою вилучення небажаних рідин з твердих речовин, так і на стадії доведення цільових продуктів до кондиції з метою підвищення сипучості речовин або зниження транспортних витрат.

Вологу можна видалити з вологих матеріалів механічними способами (віджимом, відстоюванням, центрифугуванням та фільтруванням). Суттєвим недоліком цих способів являється досить значна залишкова вологість матеріалів. Найбільш повне зневоднення досягається шляхом випарування вологи та відводу утвореної пари, тобто за допомогою теплового сушіння.

В хімічних виробництвах, як правило, використовують штучне сушіння матеріалів в спеціальних сушильних установках, так як природне сушіння на відкритому повітрі – процес довготривалий.

По способу підведення тепла до матеріалу, який висушується, розрізняють наступні види сушіння:

1) конвективне сушіння – шляхом безпосереднього контакту матеріалу який висушується з сушильним агентом. В якості сушильного агента, зазвичай, використовують нагріте повітря або димові гази (як правило в суміші з повітрям);

2) контактне сушіння – шляхом передачі тепла від теплоносія до матеріалу через розділяючу їх стінку;

3) радіаційне сушіння – шляхом передачі тепла інфрачервоним промінням;

4) діелектричне сушіння – шляхом нагрівання в полі струму високої частоти;

5) сублимаційне сушіння – сушіння в замороженому стані при глибокому вакуумі.

За своєю фізичною суттю сушіння є складним процесом тепло- і масообміну. Масообмін у цьому процесі можна уявити так (рис.1).



Рис. 1. Парціальні тиски вологи

Над поверхнею речовин у тонкому приповерхневому шарі є парціальний тиск вологи P_m . В ядрі потоку газу існує парціальний тиск вологи P_p . Якщо $P_p < P_m$, то волога дифундує з речовини у газ, доки парціальні тиски не зрівняються. Тобто йтиме процес сушіння речовини та зволоження газу до

стану рівноваги. Навпаки, коли $P_n > P_m$, волога від газу буде переходити до речовини, зволожуючи речовину та зневоложуючи газ також до стану рівноваги.

2. Властивості вологого газу

2.1. *Абсолютна вологість* визначається кількістю водяної пари в кг, що міститься в 1 м^3 вологого газу. З достатньою для технічних розрахунків точністю можна вважати, що вологий газ підкорюється законам ідеальних газів. Тоді водяна пара, як компонент газової суміші, знаходячись під парціальним тиском p_n , повинна займати весь об'єм суміші (1 м^3). Тому абсолютна вологість дорівнює масі 1 м^3 пари, або густині водяної пари ρ_n (в $\text{кг}/\text{м}^3$) при температурі газу і парціальному тиску p_n .

2.2. *Відносна вологість* – відношення маси водяної пари в 1 м^3 вологого газу ρ_n , при даних умовах, температурі та загальному барометричному тиску до максимально можливої маси водяної пари в 1 м^3 газу ρ_n (густини насиченої пари) за тих же умов:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n} . \quad (1)$$

Якщо застосувати рівняння Менделєєва–Клапейрона отримаємо рівняння для густини пари та густини насиченої пари:

$$\rho_n = \frac{p_n M_n}{RT} \quad \text{та} \quad \rho_n = \frac{p_n M_n}{RT} , \quad (2)$$

де T – абсолютна температура, $^{\circ}\text{К}$;

M_n – маса 1 кмоль водяної пари, яка дорівнює 18 $\text{кг}/\text{кмоль}$;

R – універсальна газова стала, яка дорівнює 8314 $\text{Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{град})$;

p_n – тиск насиченої водяної пари при даній температурі та загальному барометричному тиску, $\text{н}/\text{м}^2$.

Підставивши значення ρ_n та ρ_n у вираз (1) отримаємо:

$$\phi = \frac{p_n}{p_n} \quad (3)$$

2.3. *Вологовміст газу* – маса водяної пари, що міститься у вологому газі і приходить на 1 кг абсолютно сухого газу:

$$x = \frac{m_n}{m_{c.z}} = \frac{\rho_n}{\rho_{c.z}} \quad (4)$$

де m_n і $m_{c.z}$ – маса водяної пари та маса абсолютно сухого газу в даному об'ємі вологого газу, кг ;

$\rho_{c.z}$ – густина абсолютно сухого газу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Якщо замінити густину газу та пари виразом (2), отримаємо:

$$x = \frac{\rho_n}{\rho_{c.z}} = \frac{M_n p_n}{M_{c.z} p_{c.z}} = \frac{M_n}{M_{c.z}} \cdot \frac{p_n}{p_{c.z}} , \quad (5)$$

де $M_{c.z.}$ – маса l кмоль абсолютно сухого газу, кг/кмоль;

$p_{c.z.}$ – парціальний тиск абсолютно сухого газу.

Виходячи із закону Дальтона $p_{c.z.}$ дорівнює різниці загального тиску вологого газу P та парціального тиску водяної пари в ньому:

$$p_{c.z.} = P - p_n$$

Виразивши парціальний тиск пари із виразу (3) та підставивши в вираз (5), отримаємо:

$$x = \frac{M_n}{M_{c.z.}} \cdot \frac{\phi p_n}{P - \phi p_n}. \quad (6)$$

Тоді вологовміст повітря, яке містить пари води буде:

$$x = \frac{18}{29} \cdot \frac{\phi p_n}{P - \phi p_n} = 0,622 \cdot \frac{\phi p_n}{P - \phi p_n}$$

2.4. *Тепловміст (ентальпія)* вологого газу відноситься до 1кг абсолютно сухого газу і визначається при даній температурі газу t (в $^{\circ}\text{C}$) як сума ентальпій абсолютно сухого газу $c_{c.z.}t$ та водяної пари xi_n (Дж/кг сухого газу)

$$I = c_{c.z.}t + xi_n, \quad (7)$$

де $c_{c.z.}$ – середня питома теплоємність абсолютно сухого газу, Дж/(кг·К);

t – температура газу, $^{\circ}\text{C}$;

x – вологовміст газу, кг/кг $_{c.z.}$;

i_n – ентальпія водяної пари, Дж/кг

$$i_n = c_n t + r_0;$$

c_n – питома теплоємність пари, Дж/(кг·град);

r_0 – прихована теплота пароутворення, Дж/кг.

2.5. *Температурою точки роси $t_{m.p.}$* вологого газу називається температура насиченого вологого газу, якщо стан насичення досягається шляхом охолодження газу при постійному вологовмісті, тобто $x_{ноч} = x_k$.

2.6. *Температурою мокрого термометра $t_{m.m.}$* називається температура насиченого вологого газу, якщо стан насичення досягається шляхом охолодження газу при постійному тепловмісті, тобто $I_{ноч} = I_k$.

Експериментально температуру мокрого термометра можна визначити, якщо термометр обмотати тканиною та занурити його у рідину, від якої сушать газ (рис. 2). Завдяки капілярним силам волога піднімається по тканині та ізолює газ під нею від навколишнього середовища. Теплота ізольованого газу йде на утворення пари з вологи, при цьому газ насичується вологою. Температура, при якій досягається стан насичення і є температурою мокрого

термометра. Прилад, який поєднує два термометри – мокрий та сухий, називається психрометром.

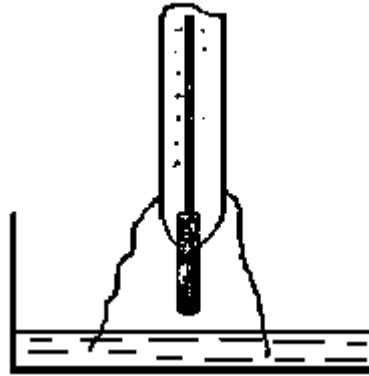


Рис.2. Схема мокрого термометра

2.7. *Потенціал сушіння* це різниця температур сухого та мокрого термометрів:

$$\varepsilon = t - t_{m.m.} \quad (8)$$

де t – температура сухого термометра, *град*;

$t_{m.m.}$ – температура мокрого термометра, *град*.

Потенціал сушіння характеризує швидкість випаровування вологи з матеріалу, яка залежить від стану газу та температури процесу, тобто визначається сумісним впливом тепло– та масообміну. Коли газ повністю насичується вологою ($t_s = t_{m.m.}$), величина ε дорівнює нулю.

Як бачимо, усі параметри вологого газу пов'язані між собою. Достатньо знати тільки два з них, щоб можна було знайти останні за рівняннями. Але розрахунок займає багато часу. Професор Петербурзького технологічного інституту Рамзін запропонував діаграму стану вологого повітря при загальному тиску 735 мм рт. ст., створену на підставі наведених рівнянь. Можна також створити діаграму для будь-якої пари «газ-волога». Вісь ординат містить шкалу тепловмісту та температур, вісь абсцис – вологовміст. Праворуч побудована додаткова шкала парціального тиску водяної пари. Приклад визначення параметрів вологого повітря для точки А зображені на рис. 3 товстими лініями.

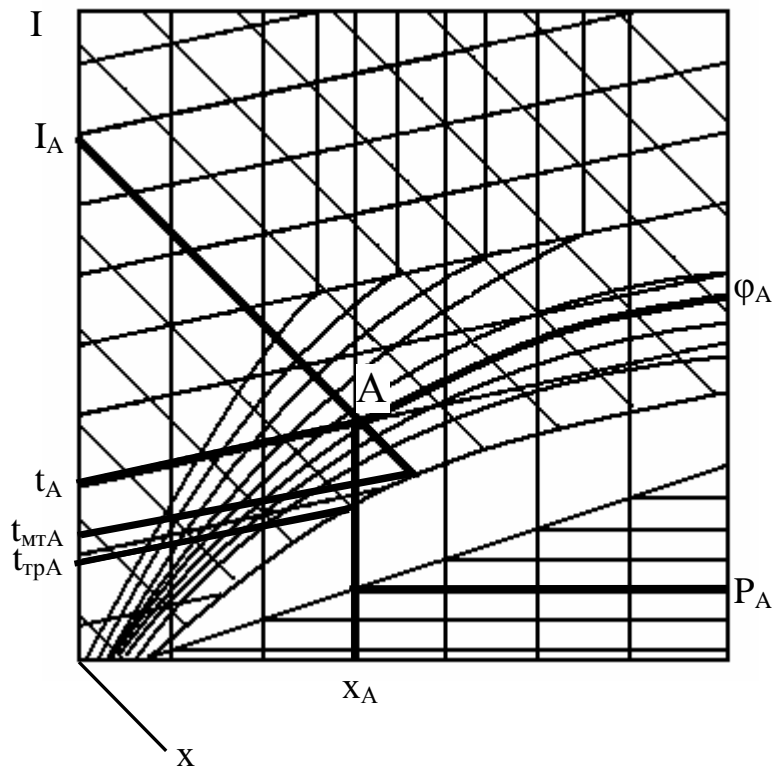


Рис. 3. Діаграма Рамзіна

3. Вологість матеріалу

Оскільки вологий матеріал містить абсолютно сухий матеріал і вологу, то кількість вологого матеріалу можна визначити наступним чином:

$$G = G_c + G_g. \quad (9)$$

де G_c – кількість абсолютно сухого матеріалу, кг;

G_g – кількість води, що міститься в матеріалі, кг.

Вологість матеріалу, віднесена до загальної кількості вологого матеріалу(%):

$$\omega = \frac{G_g}{G} \cdot 100$$

Вологість, віднесена до кількості абсолютно сухого матеріалу (%):

$$\omega^c = \frac{G_g}{G_c} \cdot 100.$$

Кількість абсолютно сухого матеріалу не змінюється в процесі сушіння і для спрощення розрахунків, зазвичай, користуються величиною ω^c .

Вологість, віднесена до кількості абсолютно сухого матеріалу ω^c , та вологість, розрахована на його загальну кількість ω , пов'язані між собою залежностями (%):

$$\omega = \frac{\omega^c}{100 + \omega^c} \cdot 100, \quad (10)$$

або

$$\omega^c = \frac{\omega}{100 - \omega} \cdot 100.$$

4. Форми зв'язку вологи з матеріалом

Механізм процесу сушіння в значній мірі визначається формою зв'язку вологи з матеріалом: чим міцніше цей зв'язок, тим складніше протікає процес сушіння.

П.А.Ребіндером запропонована наступна класифікація форм зв'язку вологи з матеріалом: хімічна, фізико-хімічна та фізико-механічна.

Хімічно зв'язана волога має найбільш міцний зв'язок з матеріалом і може бути видалена лише при нагріванні матеріалу до високих температур або в результаті проведення хімічної реакції. Ця волога не може бути видалена із матеріалу в процесі сушіння.

В процесі сушіння видаляється, як правило, тільки волога, зв'язана з матеріалом фізико-хімічно та механічно. Найбільш легко може бути видалена механічно зв'язана волога, яка в свою чергу, поділяється на вологу макрокапілярів і мікрокапілярів. Макрокапіляри заповнюються вологою при безпосередньому контакті її з матеріалом, в той час як в мікрокапіляри волога поступає як і при безпосередньому контакті, так і в результаті поглинання її з навколишнього середовища.

Фізико-хімічний зв'язок поєднує два види вологи: адсорбційно та осматично зв'язану вологу. Перша міцно утримується на поверхні та в порах матеріалу. Осматично зв'язана волога, називається також вологою набухання, знаходиться всередині клітин матеріалу та утримується осматичними силами.

В процесі сушіння вологу матеріалу поділяють на вільну та зв'язану. Під вільною розуміють вологу, швидкість випаровування якої з матеріалу дорівнює швидкості випаровування води з вільної поверхні. Під зв'язаною розуміють вологу, швидкість випаровування якої із матеріалу менше швидкості випаровування води з вільної поверхні.

5. Рівновага в процесі сушіння

Якщо матеріал знаходиться в контакті з вологим газом, то принципово можливі два процеси:

1) сушка (десорбція вологи з матеріалу) при парціальному тискові пари над поверхнею матеріалу p_m , що перевищує його парціальний тиск в газі p_n , тобто при $p_m > p_n$;

2) зволоження (сорбція вологи матеріалом) при $p_m < p_n$.

В процесі сушіння величина p_m зменшується і наближається до $p_m = p_n$. При цьому настає стан динамічної рівноваги, якому відповідає гранична вологість матеріалу, що називається рівноважною вологістю ω_p .

Рівноважна вологість залежить від парціального тиску водяної пари над матеріалом p_n або пропорційній йому величині відносної вологості газу φ і визначається дослідним шляхом.

На рис.4. представлена залежність рівноважної вологості матеріалу від відносної вологості газу.

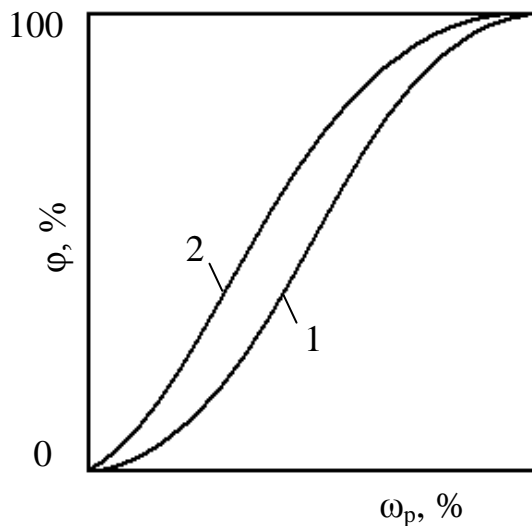


Рис. 4. Залежність рівноважної вологості матеріалу від відносної вологості газу:

- 1 – ізотерма десорбції;
- 2 – ізотерма сорбції.

Крива 1 на рис.4. одержана при випаровуванні (десорбції) вологи із матеріалу, тобто при його сушінні і називається ізотермою десорбції. Вищерозміщена крива 2, одержана при зворотньому процесі – зволоженні висушеного матеріалу – називається ізотермою сорбції.

Розходження кривих 1 і 2 (гістерезис) вказує на те, що для досягнення однієї і тієї ж рівноважної вологості газу величина φ при зволоженні матеріалу повинна бути більша, ніж при сушінні останнього. (ізотерма сорбції 2 розташована вище ізотерми 1).

6. Матеріальний баланс конвекційної сушарки

Для складення матеріального балансу конвекційної сушарки скористуємось її принциповою схемою, яка приведена на рис.7.

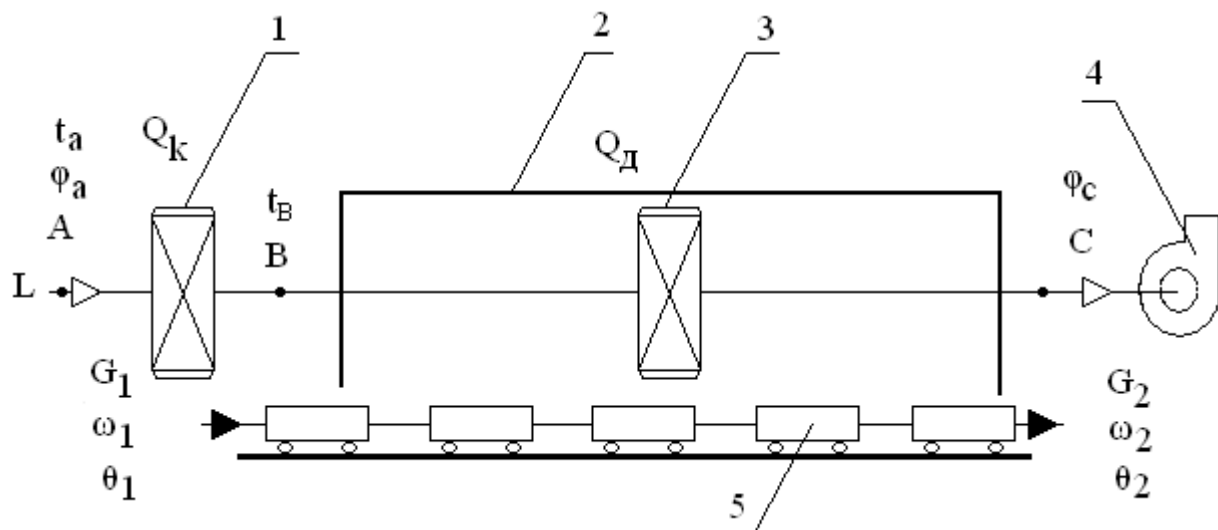


Рис.7. Принципова схема сушарки:
 1 – основний калорифер; 2 – сушильна камера;
 3 – додатковий калорифер; 4 – вентилятор;
 5 – транспортний пристрій

Сушильний агент – газ або повітря з витратою за абсолютно сухим газом L , температурою t_a та відносною вологістю φ_a , вентилятором 4 подається крізь калорифер 1 в якому підігрівається до максимально допустимої температури, у сушильну камеру 2. Туди ж подається транспортним пристроєм 5 вологий матеріал: вологість ω_1 , температура θ_1 , витрата G_1 . За рахунок нагрівання матеріалу газом з першого випаровується волога, що видаляється з газом, який насичується вологою до відносної вологості φ . В результаті процесу сушіння одержують сухий матеріал: вологість ω_2 , температура θ_2 , витрата G_2 .

Матеріальний баланс по всьому матеріалу, що підлягає сушінню:

$$G_1 = G_2 + W \quad (11)$$

де G_1 – кількість вологого матеріалу, що поступає на сушіння, кг/ч;
 G_2 – кількість висушеного матеріалу, кг/ч;
 W – кількість вологи, що видаляється з матеріалу при сушінні, кг/ч.

Матеріальний баланс по абсолютно сухій речовині в матеріалі що підлягає сушінню:

$$G_1 \frac{100 - \omega_1}{100} = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100} \quad (12)$$

де ω_1 та ω_2 – початкова та кінцева вологість матеріалу відповідно, %.

З виразу (12) слідує:

$$G_1 = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1} \quad (13)$$

та

$$G_2 = G_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} \quad (14)$$

Зазвичай, метою складання матеріального балансу являється визначення кількості вологи W , що видаляється при сушінні. З виразу (11) знаходимо:

$$W = G_1 - G_2 \quad (15)$$

Підставимо в вираз (15) значення G_2 з виразу (14) отримаємо:

$$W = G_1 - G_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} \quad (16)$$

При підстановці в вираз (15) значення G_1 з виразу (13) отримаємо:

$$W = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1}$$

Матеріальний баланс по волозі:

$$Lx_0 + W = Lx_2 \quad (17)$$

де L – витрата абсолютно сухого повітря, $кг/ч$;

x_0 та x_2 – початковий та кінцевий вологовміст повітря відповідно, $кг/кг$ сухого повітря.

З виразу (17) визначимо витрату абсолютно сухого повітря на сушіння:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}$$

Питома витрата повітря на випарування із матеріалу 1 кг вологи дорівнює відповідно:

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (18)$$

7. Тепловий баланс конвекційної сушарки

Для складення теплового балансу визначимо прихід та витрату теплоти в сушарці.

Прихід теплоти до сушильної камери:

а) з газом - $Q_{zn} = LI_0$;

б) з вологим матеріалом, що складається з теплоти вологи - $Q_e = Wc_e\theta_1$;
та теплоти висушеного матеріалу - $Q_{m1} = G_2c_m\theta_1$;

в) внесене основним калорифером - $Q_k = L(I_1 - I_0)$;

г) внесене транспортним устаткуванням - $Q_{mp} = G_{mp}c_{mp}t_{mpn}$;

д) внесене додатковим калорифером - Q_d .

Витрата теплоти:

а) з відпрацьованим газом - $Q_{zk} = LI_2$;

б) з висушеним матеріалом - $Q_{mk} = G_2c_m\theta_2$;

в) з транспортним устаткуванням - $Q_{mpk} = G_{mp}c_{mp}t_{mpk}$;

г) в навколишнє середовище Q_n .

Тепловий баланс сушарки:

$$LI_0 + Wc_e\theta_1 + G_2c_m\theta_1 + G_{mp}c_{mp}t_{mpn} + Q_k + Q_d = LI_2 + G_2c_m\theta_2 + G_{mp}c_{mp}t_{mpk} + Q_n \quad (19)$$

З цього виразу можна визначити загальну витрату теплоти ($Q_k + Q_d$) на сушіння:

$$Q_k + Q_d = L(I_2 - I_0) + G_2c_m(\theta_2 - \theta_1) + G_{mp}c_{mp}(t_{mpk} - t_{mpn}) - Wc_e\theta_1 + Q_n$$

Поділивши дві частини останнього виразу на W , отримаємо вираз для питомої витрати тепла:

$$q_k + q_d = l(I_2 - I_0) + q_m + q_{mp} - c_e\theta_1 + q_n \quad (20)$$

де $l(I_2 - I_0)$ - кількість теплоти, що приходить на 1 кг випареної вологи;

$q_m = G_2c_m(\theta_2 - \theta_1)/W$ - питома витрата теплоти на нагрівання матеріалу;

$q_{mp} = G_{mp}c_{mp}(t_{mpk} - t_{mpn})/W$ - питома витрата теплоти на нагрівання транспортного устаткування;

$c_e\theta_1$ - ентальпія 1 кг вологи, що поступає в сушарку і випаровується із матеріалу;

$q_n = Q_n/W$ - питома витрата теплоти у навколишнє середовище.

Питома витрата теплоти в основному калорифері можна також представити у вигляді:

$$q_k = l(I_1 - I_0) \quad (21)$$

Підставивши значення q_k в вираз (20), знаходимо

$$l(I_1 - I_0) + q_d = l(I_2 - I_0) + q_m + q_{mp} - c_e\theta_1 + q_n$$

або

$$l(I_2 - I_1) = q_d + c_e\theta_1 - q_m - q_{mp} - q_n \quad (22)$$

Позначивши праву частину виразу (22) через Δ

$$(q_d + c_e \theta_1) - (q_m + q_{mp} + q_k) = \Delta$$

запишемо його в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} l(I_2 - I_1) &= \Delta \\ I_2 &= I_1 + \frac{\Delta}{l} \end{aligned} \quad (23)$$

Останній вираз являється рівнянням робочої лінії сушіння.

Величина Δ , що входить в вираз, називається внутрішнім тепловим балансом сушильної камери і виражає різницю між приходом і витратою теплоти безпосередньо в камері сушарки, без врахування теплоти, що приходить з повітрям, нагрітим в основному калорифері.

Якщо кожен доданок правої частини виразу (22) дорівнює нулю, таке сушіння називається теоретичним. Тобто $\Delta=0$. При цьому згідно з тепловим балансом (23) для теоретичного сушіння $I_2=I_1$. В реальних сушарках ентальпія повітря в сушильній камері зазвичай не залишається постійною. Якщо прихід теплоти в камеру сушарки більше його витрати, тобто величина Δ позитивна, то відповідно до виразу (23) ентальпія повітря при сушінні збільшується ($I_2>I_1$). При негативному значенні Δ ентальпія повітря в процесі сушіння зменшується і $I_2<I_1$. В деяких випадках, в реальній сушарці можливо, що прихід теплоти в сушильну камеру дорівнює її витраті

$$q_d + c_e \theta_1 = q_m + q_{mp} + q_n$$

тоді величина Δ також буде дорівнювати нулю і процес сушіння в реальних умовах буде рівнозначним процесу в теоретичній сушарці.

8. Визначення витрат повітря та тепла на сушіння

До числа основних задач технологічного розрахунку сушарок відноситься визначення витрат повітря (газу) та тепла на сушіння.

Розглянемо зображення процесу сушіння в теоретичній сушарці (рис.8а). Для розрахунку повинні бути відомі два будь-яких параметра зовнішнього повітря. Зазвичай такими параметрами являються його температура t_0 та відносна вологість φ_0 . На перетині ліній $t_0=\text{const}$ та $\varphi_0=\text{const}$ знаходять точку А, що характеризує стан повітря перед калорифером. Із точки А проводять вертикаль до перетину з ізотермою $t_1=\text{const}$, де t_1 – температура повітря після калорифера, яка повинна бути задана. Точка перетину В характеризує стан нагрітого повітря перед входом в сушильну камеру. Вертикальний відрізок АВ відображує процес нагріву повітря в калорифері, що протікає при $x_0=x_1=\text{const}$. Із точки В проводять лінію I_1 , яка відображає адіабатичний процес зміни стану повітря в сушарці. Крім величин x_0 , φ_0 та t_1 при розрахунках повинен бути

заданий один із параметрів відпрацьованого повітря – зазвичай t_2 або φ_2 . Тому, продовживши лінію $I_1 = \text{const}$ до перетину з ізотермою $t_2 = \text{const}$ або лінією $\varphi_2 = \text{const}$, отримують точку С, що відображає стан відпрацьованого повітря на виході із сушарки. Відрізок ВС, паралельний осі абсцис ($I_1 = I_2 = \text{const}$), відображає охолодження повітря в процесі сушіння.

Ломана лінія АВС – графічне відображення всього процесу зміни стану повітря в теоретичній сушарці, що працює по основній схемі.

Завершивши побудову, для точок А та С знаходять на діаграмі значення $x_0 = x_1$ та x_2 [для розрахунку питомої витрати повітря за виразом (18)] та для точок В та А – значення I_1 та I_0 , з допомогою яких за виразом (21) визначають питому витрату теплоти q_k в основному калорифері. Перемноживши величини l та q_k на W , знаходять витрати повітря L та тепла Q на сушіння.

Для зображення процесу в реальній сушарці із точки А, що характеризує стан повітря перед калорифером, проводять вертикаль до перетину із заданою ізотермою $t_1 = \text{const}$. Із точки перетину В, що характеризує стан нагрітого повітря перед входом в сушильну камеру (рис.8б) проводять лінію $I = \text{const}$ довільної довжини. На цій лінії вибирають будь-яку точку e та відкладають від неї вгору (при $\Delta > 0$) або вниз (при $\Delta < 0$) відрізок

$$eE = ef \frac{\Delta}{M}$$

де ef – відстань по горизонталі від точки e до АВ;

$M = m_y / m_x$ – відношення масштабів діаграми І-х.

Кінець відрізка eE (точка Е) лежить на лінії процесу в реальній сушарці. Тому, з'єднуючи Е і В та продовжуючи ВЕ до перетину із заданою ізотермою $t_2 = \text{const}$ (або $\varphi_2 = \text{const}$), знаходять точку C_1 або C_2 , що характеризує стан відпрацьованого повітря.

Питомі витрати сухого повітря l та тепла на калорифер q_k визначають так само як це зазначалось вище.

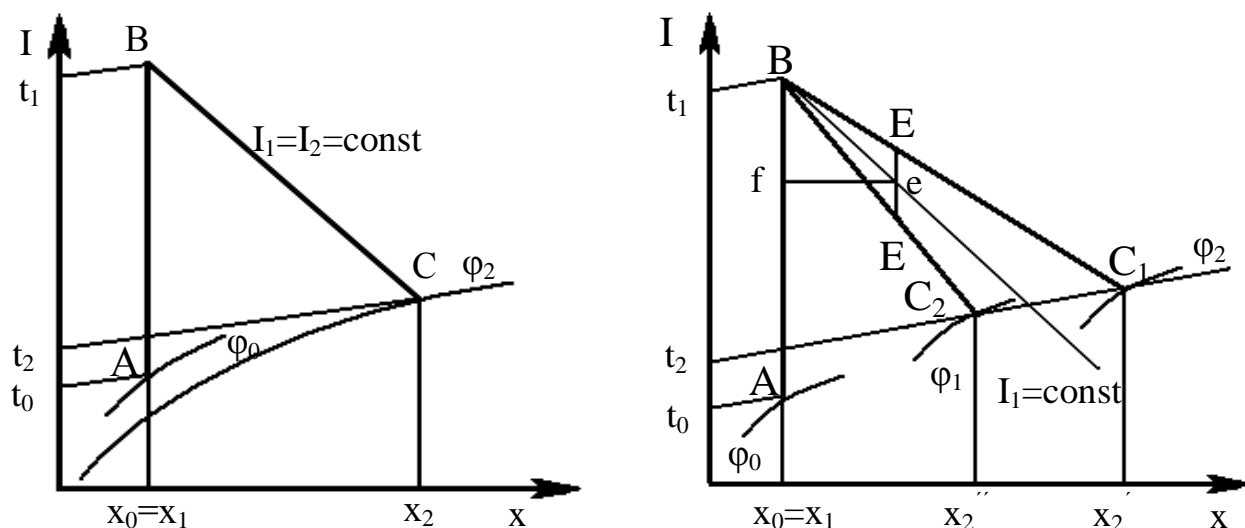


Рис. 8. Зображення процесів сушіння на І – х діаграмі:
а – теоретична сушарка; б – реальна сушарка.

9. Швидкість сушіння

Швидкість сушіння – визначається зменшенням вологості матеріалу $d\omega^c$ за деякий нескінченно малий проміжок часу $d\tau$, тобто виражається співвідношенням:

$$N = \frac{d\omega^c}{d\tau} \quad (24)$$

Швидкість сушіння визначає один з найголовніших технологічних параметрів – інтенсивність випарування води із матеріалу m , яка виражається кількістю води, що випаровується з одиниці поверхні матеріалу F в одиницю часу:

$$m = \frac{W}{F\tau}$$

де τ – загальна тривалість процесу сушіння.

Процес сушіння проходить зі швидкістю, яка залежить від форми зв'язку води з матеріалом та механізму переміщення в ньому води. Кінетика сушіння характеризується зміною в часі середньої вологості матеріалу, яка віднесена до кількості абсолютно сухого матеріалу ω^c . Залежність між вологістю ω^c матеріалу та часом зображується кривою сушіння (рис.5), яку будують по дослідним даним.

Крива сушіння складається з декількох частин, що відповідають різним періодам сушіння. Як видно з рисунку 5, після досить невеликого проміжку часу, періоду прогріву матеріалу, протягом якого відбувається незначна зміна його вологості (відрізок АВ), настає період постійної швидкості сушіння (I період). При цьому вологість матеріалу інтенсивно зменшується за прямолінійним законом (відрізок ВС). Таке зменшення вологості спостерігається до досягнення першої критичної вологості $\omega_{кр1}^c$, після чого починається II період сушіння під час якого швидкість сушіння весь час спадає. В цьому періоді зменшення вологості матеріалу виражається деякою кривою (крива СЕ), яка складається із двох відрізків (відрізок СД та ДЕ). Точка перегину Д відповідає другій критичній вологості $\omega_{кр2}^c$, при якій досягається рівноважна вологість на поверхні матеріалу. В кінці другого періоду сушіння вологість матеріалу наближається до рівноважної. Досягнення рівноважної вологості ω_p^c означає повне припинення подальшого випарування води з матеріалу.

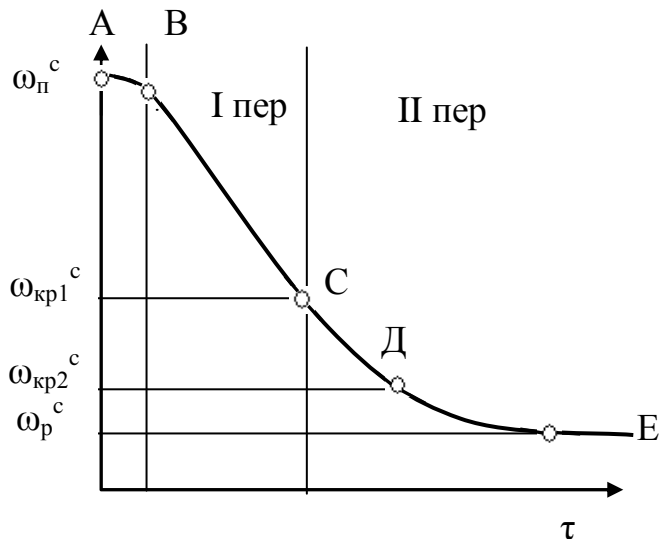


Рис. 5. Крива сушіння

На рис.6 показана крива швидкості сушіння, отримана шляхом диференціювання кривої сушіння (рис.5). Горизонтальний відрізок BC відповідає першому періоду сушіння, коли швидкість сушіння незмінна, а відрізок CE – другому періоду сушіння, під час якого швидкість сушіння весь час спадає. В першому періоді випаровується вільна волога, в другому – зв'язана.

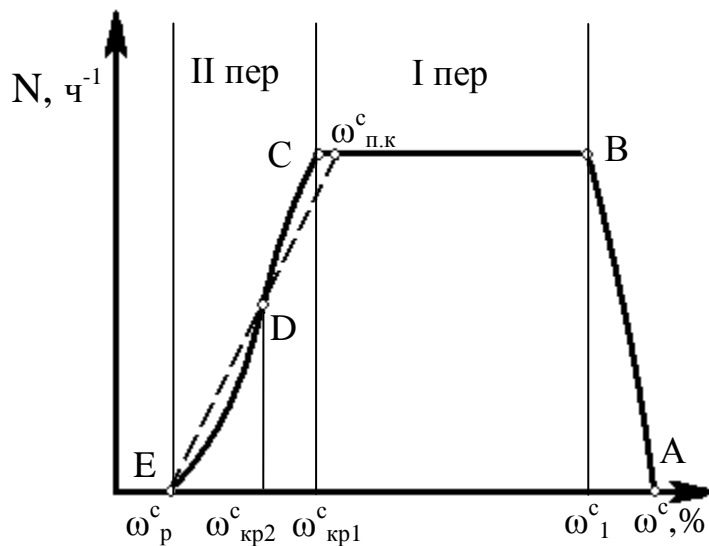


Рис.6. Крива швидкості сушіння

10. Тривалість сушіння

Тривалість процесу сушіння може бути визначена за виразом:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (25)$$

де τ_1 – тривалість процесу сушіння в першому періоді;

τ_2 – тривалість процесу сушіння в другому періоді.

Тривалість першого періоду сушіння. Швидкість процесу сушіння в першому періоді:

$$\frac{d\omega^c}{d\tau} = -N \quad (26)$$

Проінтегруємо вираз (26)

$$\int_{\omega^c_1}^{\omega^c_{кр1}} d\omega^c = - \int_0^{\tau_1} N d\tau$$

$$\omega^c_{кр1} - \omega^c_1 = -N\tau_1 \quad (27)$$

Тоді згідно з виразом (14) тривалість сушіння за перший період буде:

$$\tau_1 = \frac{\omega^c_1 - \omega^c_{кр1}}{N} \quad (28)$$

Тривалість другого періоду сушіння. Тривалість сушіння цього періоду може бути визначена за допомогою коефіцієнта швидкості сушіння K_c .

Для розрахунку K_c використовують дослідну криву швидкості сушіння даного матеріалу, заміняючи в ній криволінійний відрізок (що відповідає другому періоду сушіння) похилою прямою, яка проводиться із точки ω^c_p до горизонтального прямолінійного відрізка, що відповідає періоду постійної швидкості (пунктирна лінія на рис.6). Верхній кінець цієї прямої відповідає приведеній критичній вологості $\omega^c_{н.к}$, якою заміняють в першому наближенні першу критичну вологість $\omega^c_{кр1}$.

Швидкість сушіння для другого періоду може бути виражена:

$$N = -\frac{d\omega^c}{d\tau} = K_c(\omega^c_{н.к} - \omega^c_p), \quad (29)$$

де $K_c = \frac{N}{\omega^c_{н.к} - \omega^c_p}$ – коефіцієнт швидкості сушіння;

Запишемо вираз (29) у вигляді:

$$\frac{d\omega^c}{\omega^c_{н.к} - \omega^c_p} = -K_c d\tau$$

та проінтегруємо його ліву частину в межах від $\omega^c_{н.к}$ до ω^c_2 (кінцева вологість матеріалу після сушіння), а праву – в межах від τ_1 , яке на початку другого періоду дорівнює нулю, до τ_2 .

$$\int_{\omega^c_{н.к}}^{\omega^c_2} \frac{d\omega^c}{\omega^c_{н.к} - \omega^c_p} = - \int_{\tau_1}^{\tau_2} K_c d\tau$$

$$\ln \frac{\omega^c_2 - \omega^c_p}{\omega^c_{н.к} - \omega^c_p} = -K_c \tau_2$$

звідки тривалість другого періоду сушіння буде:

$$\tau_2 = \frac{I}{K_c} \ln \frac{\omega_{n.k}^c - \omega_p^c}{\omega_2^c - \omega_p^c} = \frac{I}{N} (\omega_{n.k}^c - \omega_p^c) \ln \frac{\omega_{n.k}^c - \omega_p^c}{\omega_2^c - \omega_p^c}. \quad (30)$$

Тоді загальна тривалість сушіння складає:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{I}{N} \left[\omega_1^c - \omega_{n.k}^c + (\omega_{n.k}^c - \omega_p^c) \ln \frac{\omega_{n.k}^c - \omega_p^c}{\omega_2^c - \omega_p^c} \right]. \quad (31)$$

11. Варіанти сушіння

Найпростішим процесом сушіння являється процес, що здійснюється по основній схемі (рис.9).

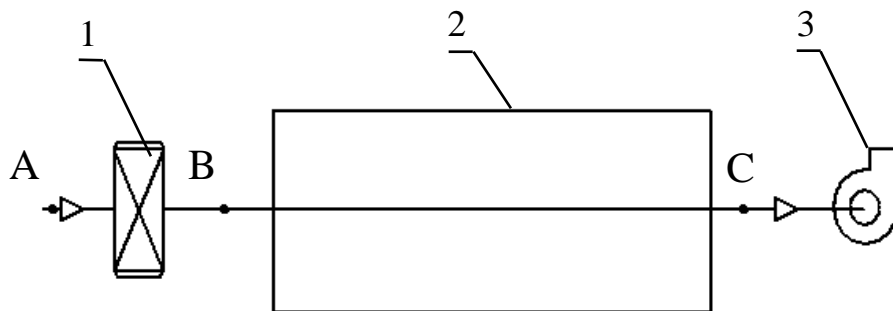


Рис. 9. Схема основного (нормального) варіанту сушіння:
1 – калорифер; 2 – сушильна камера; 3 – вентилятор

Це дешеве і надійне сушіння. Сушильний агент тут нагрівається один раз в основному калорифері до найвищої температури та потрапляє в сушильну камеру, де за рахунок нагрівання та випаровування рідини і нагрівання матеріалу газ знижує свою температуру, завдяки чому різко знижується швидкість сушіння.

З метою запобігання різкого зниження температури запропоновано сушіння з додатковим підігріванням газу в зоні сушіння (рис. 10), яке забезпечує рівномірну швидкість сушіння.

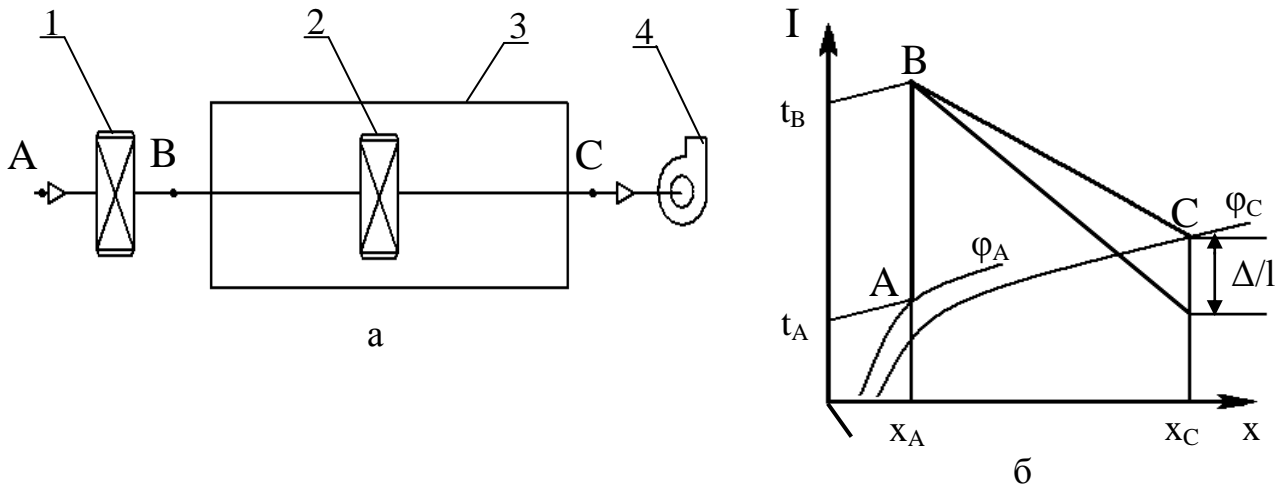
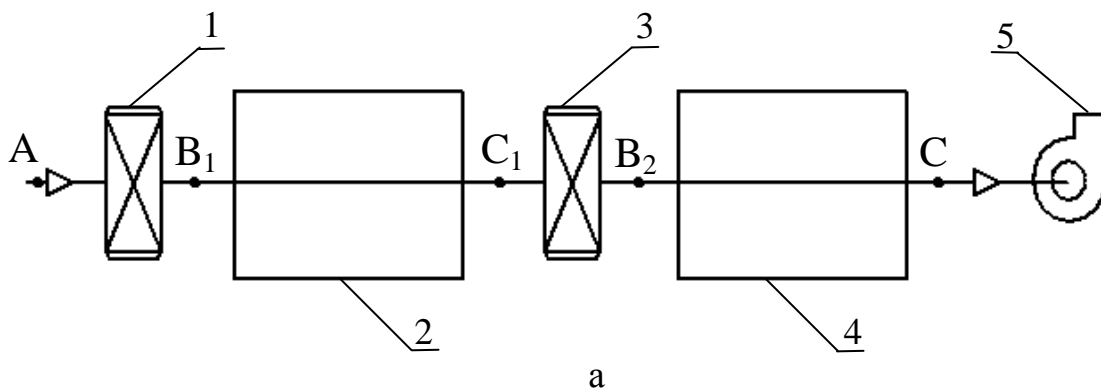


Рис. 10. Сушіння з додатковим підігрівом газу в сушильній камері:
 а – принципова схема; б – зображення процесу на I-x діаграмі;
 1 – головний калорифер; 2 – додатковий калорифер;
 3 – сушильна камера; 4 – вентилятор

Витрати теплоти в сушарках нормального варіанта та варіанта з додатковим підігріванням сушильного агенту однакові, якщо відповідні параметри свіжого та відпрацьованого газу однакові. Але конструкція сушильної камери з додатковим підігріванням значно складніша та дорожча.

Сушіння з проміжним підігрівом сушильного агенту між зонами сушіння (рис. 11) позбавлене цього недоліку, тому що газ підігрівається поза зонами сушіння. На діаграму Рамзіна процес сушіння наносять для кожної зони сушіння як для нормального варіанта, але з відповідними індивідуальними значеннями Δ для кожної зони сушіння.



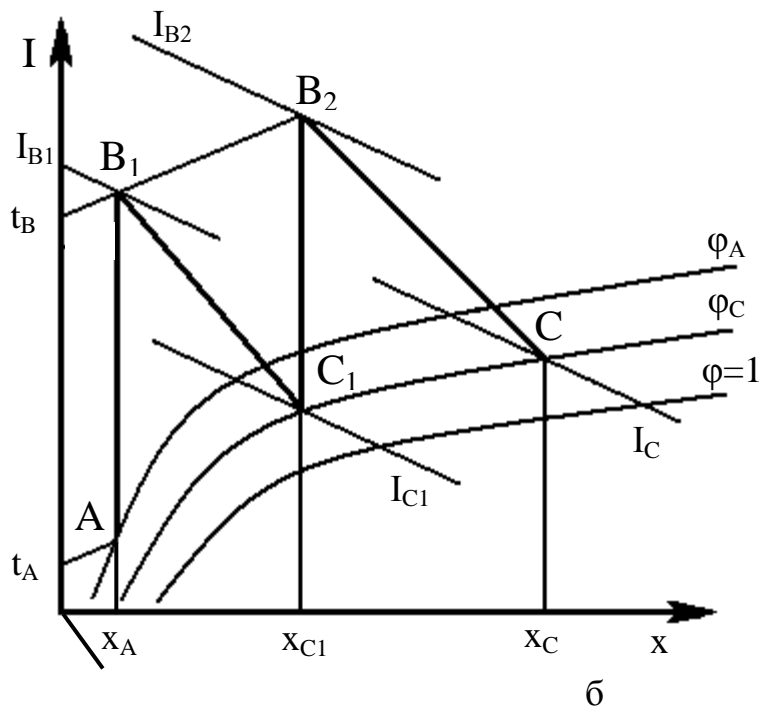


Рис.11. Сушіння з проміжним підігрівом газу по зонам:
 а – принципова схема; б – зображення процесу на I-x діаграмі;
 1, 3 – калорифери; 2, 4 – зони сушіння; 5 – вентилятор

Питома витрата газу для сушіння:

$$\ell = \frac{I}{x_C - x_A},$$

де x_C – кінцевий вологовміст відпрацьованого газу наприкінці процесу сушіння.

Питома витрата теплоти складається з суми витрат теплоти перед кожною зоною сушіння:

$$\Sigma q_{kn} = \ell(I_{B1} - I_A) + \ell(I_{B2} - I_{C1}) + \dots + \ell(I_{Bn} - I_{Cn-1}).$$

Для теоретичних сушарок з проміжним підігріванням газу перед кожною зоною сушіння та сушарок нормального варіанта в разі однакових відповідних параметрів сушильного агента на початку та наприкінці сушіння витрата теплоти однакова, тому що:

$$q = \ell(I_{B1} - I_A) + \ell(I_{B2} - I_{C1}) = \ell(I_C - I_A).$$

Загальний недолік усіх наведених варіантів сушіння – сушіння газом з низьким вологовмістом x_A , що незавжди добре, тому що деякі матеріали не витримують швидкого сушіння (штучні глиняні вироби). Для цих матеріалів необхідний вологий газ. Такий газ можна отримати у сушарці з частковою рециркуляцією відпрацьованого агента (рис. 12), де на сушіння йде суміш сухого та насиченого вологою відпрацьованого газу.

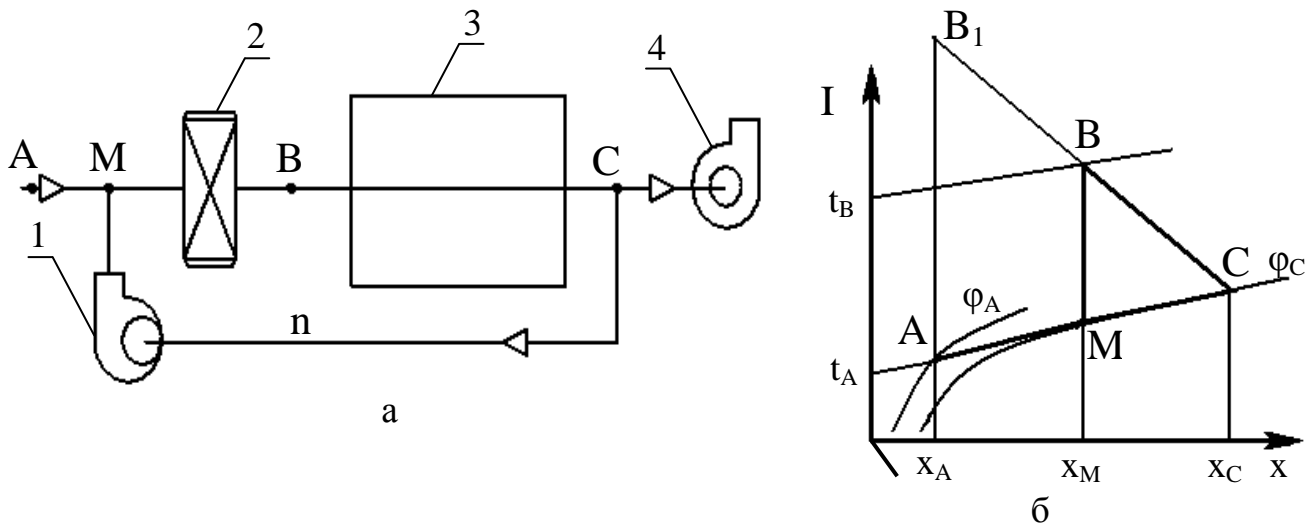


Рис. 12. Схема варіанта сушіння з частковою рециркуляцією газу:
 а – принципова схема; б – зображення процесу на I-x діаграмі;
 1, 4 – вентилятори; 2 – калорифер; 3 – сушильна камера

Параметри зволоженого газу в точці М розраховують на підставі матеріального та теплового балансів змішування свіжого та відпрацьованого газу.

$$l_A x_A + l_C x_C = (l_A + l_C) x_M;$$

$$l_A I_A + l_C I_C = (l_A + l_C) I_M.$$

Розділивши всі члени правої частини отриманих рівнянь на l_A та позначивши відношення l_C/l_A через n (кратність змішування), отримаємо:

$$x_A + n x_C = (1 + n) x_M$$

$$I_A + n I_C = (1 + n) I_M$$

Звідси отримаємо параметри зволоженого газу:

$$x_M = \frac{x_A + n x_C}{1 + n}; \quad I_M = \frac{I_A + n I_C}{1 + n}.$$

Отже, лінія АМС характеризує процес змішування свіжого та відпрацьованого газів. Далі зволожений газ з параметрами в точці М потрапляє до калорифера, де підігрівається до необхідної температури, а потім – до сушарки.

Питома витрата свіжого газу:

$$l_{св} = \frac{l}{x_C - x_A}.$$

Питома витрата зволоженого газу:

$$l_{cm} = \frac{I}{x_C - x_M}.$$

Питома витрата теплоти:

$$q = l_{cm}(I_B - I_M) = \frac{I_B - I_M}{x_C - x_M}.$$

Витрати теплоти в сушарках нормального варіанта та варіанта з частковою рециркуляцією сушильного агенту однакові, якщо відповідні параметри свіжого та відпрацьованого газу однакові.

Загальний недолік усіх наведених сушарок – викид відпрацьованого сушильного агенту в навколишнє середовище, що неприпустимо, якщо волога токсична або дорога. На цей випадок запропоновано конденсаційне сушіння (рис. 13), де насичений по волозі сушильний агент з температурою t_A , відповідний точці А потрапляє до калорифера 1, нагрівається до стану, відповідному точці В, та подається до сушильної камери, де насичується парами рідини з матеріалу до стану, відповідному точці С. Насичений агент у конденсаторі 3 охолоджується до точки роси, відповідно стану точці D. При подальшому охолодженні з агенту конденсуються пари вологи до такого стану агенту, яке відповідає точці А, після чого цей агент вентилятором 5 подається до калорифера 1, тобто у цьому сушінні зовсім відсутній викид газу в атмосферу.

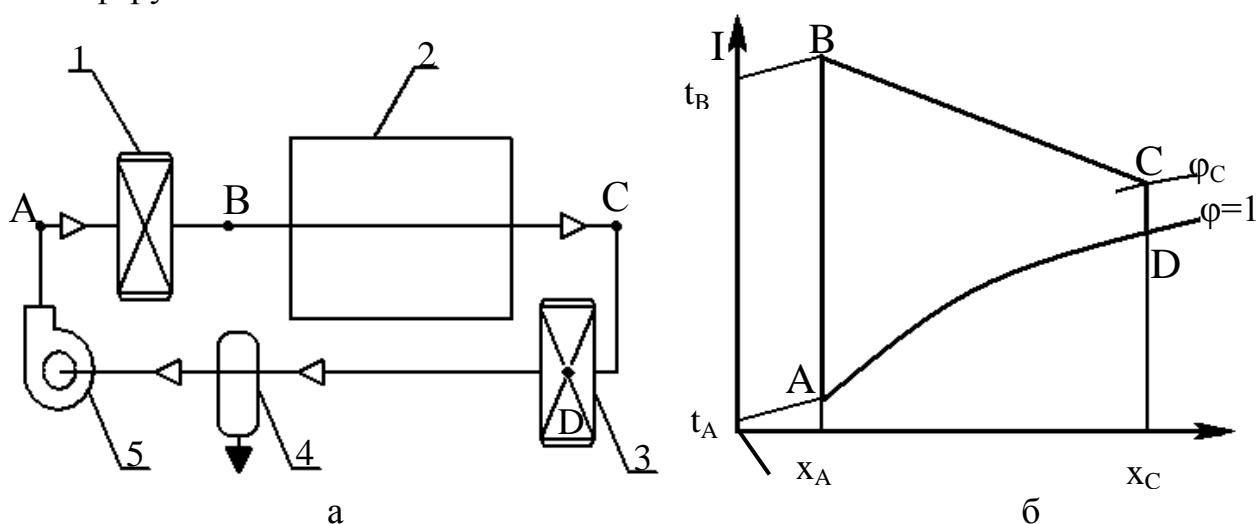


Рис. 13. Конденсаційне сушіння:

- а – принципова схема; б – зображення процесу на I-x діаграмі;
 1–калорифер; 2–сушильна камера; 3–холодильник – конденсатор;
 4–сепаратор; 5–вентилятор

Питома витрата циркуляційного агенту:

$$\ell = \frac{I}{x_C - x_A}.$$

Продуктивність вентилятора 5, $L = \ell W$.

Теплове навантаження калорифера 1, $Q_k = \ell W(I_B - I_A)$.

Теплове навантаження холодильника – конденсатора 3,

$$Q_{\text{конд.}} = \ell W(I_C - I_A).$$

Усі наведені варіанти мають загальний недолік – необхідність підігрівання сушильного агенту, що вимагає витрати дорогого теплоносія. Основні витрати на сушіння пов'язані з вартістю теплоносія. Сушіння димовими газами не має цього недоліку, тому що воно використовує гарячі викидні гази (рис.14). Сушіння димовими газами застосовується і тоді, коли матеріал витримує дуже високі температури.

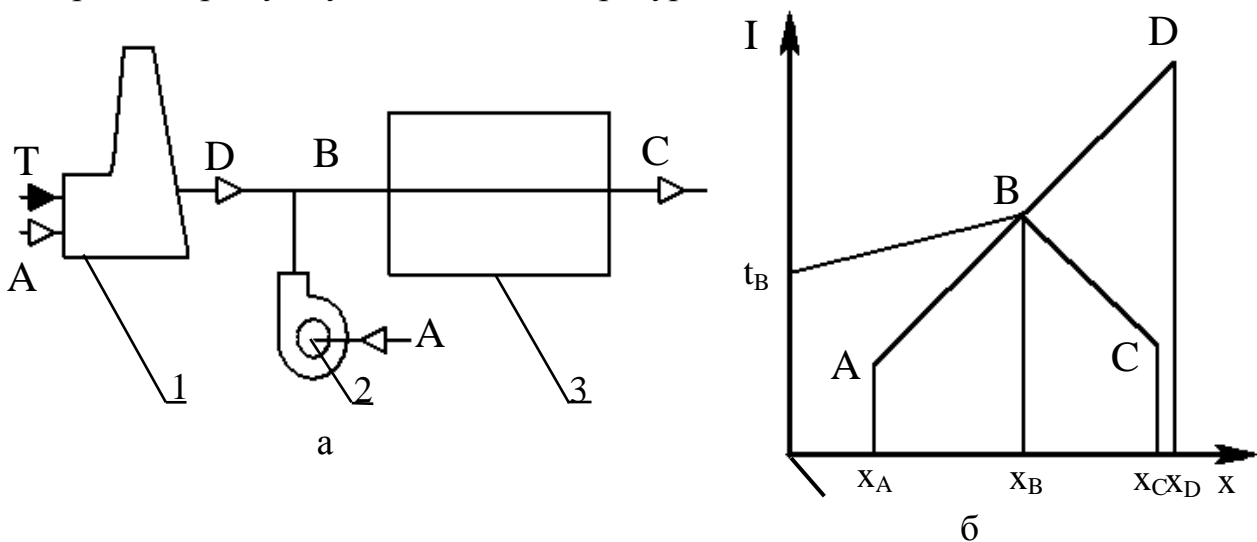


Рис. 14. Сушіння димовими газами:

а – принципова схема; б – зображення процесу на I-x діаграмі;

1 – піч; 2 – вентилятор; 3 – сушильна камера

Гарячі димові гази з печі 1 відповідні до стану в точці Д змішуються з навколишнім повітрям стану А до стану В суміші, яка має найвищу температуру, що витримує матеріал, що висушують. Отже, лінія AD відповідає процесу змішування газів. Далі йде процес сушіння матеріалу цією сумішшю в сушильній камері 3, що відповідає лінії сушіння ВС.

12. Конвекційні сушарки

За взаємним напрямком потоків сушильного агенту та вологого матеріалу сушарки поділяються на проти-, прямо- та перехреснотоківі.

Протитоківі сушарки мають найбільшу інтенсивність сушіння за рахунок більшої середньої різниці температур сушильного агенту та вологого матеріалу. Крім того, вони дозволяють досягти найбільшого ступеню сушіння.

Ці сушарки застосовуються для сушіння матеріалів, які витримують інтенсивне сушіння у підсушеному стані.

Прямотокові сушарки мають найменшу рушійну силу, а внаслідок цього й найменшу інтенсивність сушіння наприкінці процесу. Тому такі сушарки використовують для сушіння негігроскопічних матеріалів та матеріалів, які витримують велику інтенсивність сушіння у вологому стані.

Перехреснотоківі сушарки необхідні для сушіння матеріалів, які добре витримують високі температури у сухому і у вологому стані.

За тиском сушарки поділяться на атмосферні та вакуумні. Атмосферні мають менші енерговитрати, але й найменшу рушійну силу та інтенсивність сушіння. Вакуумні сушарки застосовують для матеріалів, які не витримують підвищеної температури.

За конструкцією сушарки можуть бути камерні, тунельні, стрічкові, петльові, барабанні, розпилюючі, пневматичні та киплячого шару. Вибір конструкції сушарки залежить від властивостей вологого матеріалу.

Камерні сушарки (рис. 15) є апаратами періодичної дії та використовуються у виробництвах малої продуктивності. На полиці стелажів чи вагонеток 7 навантажують вологий матеріал та зачиняють їх у камері 1 де підтримується постійна температура калорифера 3, 5. Ця сушарка може працювати за варіантом з частковою рециркуляцією за допомогою шибера 4. Матеріал на полицях лежить нерухомо, тому він нерівномірно підсушується за товщиною шару. Внаслідок цього такі сушарки застосовуються для матеріалів, які вимагають м'яких умов сушіння і допускають нерівномірність вологи за його товщиною.

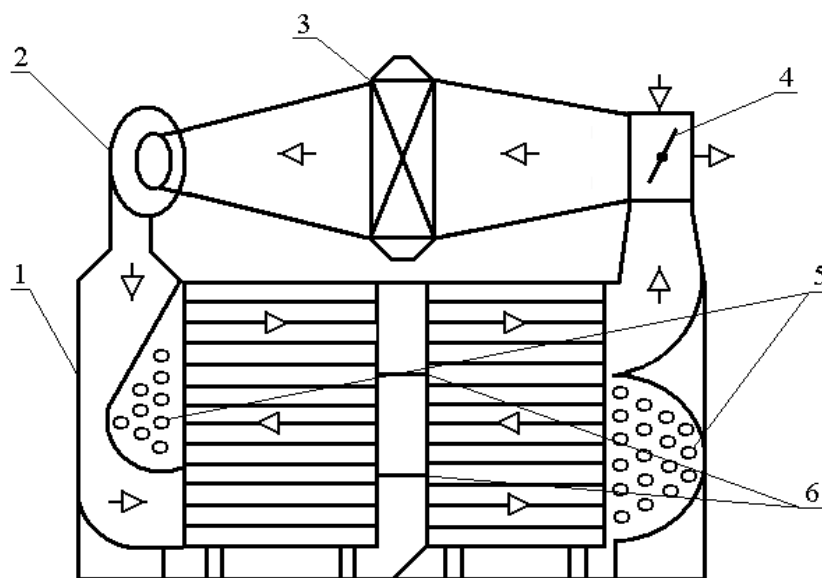


Рис.15. Схема камерної сушарки:

1- камера; 2 – вентилятор; 3 – основний калорифер; 4 – шибер;
5 – проміжний калорифер; 6 – герметичні двері; 7 – вагонетка

Тунельні сушарки (рис. 16) є різновидом камерних з тією різницею, що останні – сушарки безперервної дії: матеріал на вагонетках 2 потрапляє в сушарку 1 з одного боку, повільно рухається по ній та виходить з іншого. Ці сушарки працюють за варіантом з проміжним підігріванням сушильного агенту між зонами сушіння калориферами 4. Вони застосовуються для сушіння великої кількості окремих виробів. За інтенсивністю сушіння вони мало відрізняються від камерних сушарок та мають ті ж недоліки: значну тривалість і нерівномірність сушіння, ручне обслуговування.

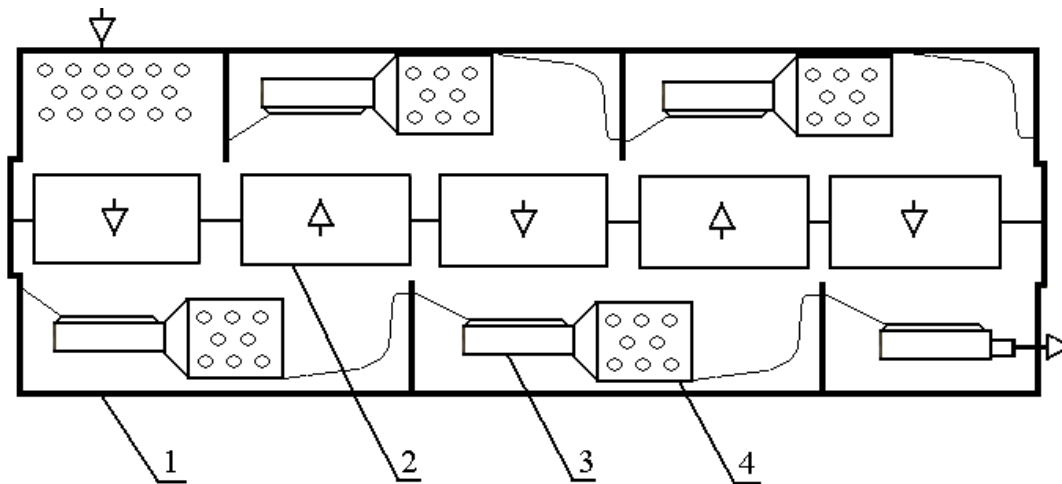


Рис.16.Схема тунельної сушарки:
1 – камера; 2 – вагонетка; 3 – вентилятор; 4 – калорифер

Стрічкові сушарки (рис. 17) виключають ручне обслуговування. Їх використовують для сушіння сипких матеріалів. Вологий матеріал автоматичним дозатором подається на транспортерну стрічку 2. Рухаючись по сушарці, матеріал висихає та розвантажується в приймальний бункер. При цьому матеріал у поверхових шарах висихає повніше, ніж у шарі, що контактує зі стрічкою. Щоб запобігти нерівномірному сушінню, застосовують багато стрічкові сушарки, в яких матеріал перевантажується зі стрічки на стрічку. Завдяки цьому, після перевантаження найнижчий шар попередньої стрічки стає верхнім на наступній стрічці, тобто ступінь сушіння за товщиною шару матеріалу усереднюється. Але такі сушарки громіздкі, дорогі та непридатні до сушіння липких та пастоподібних матеріалів.

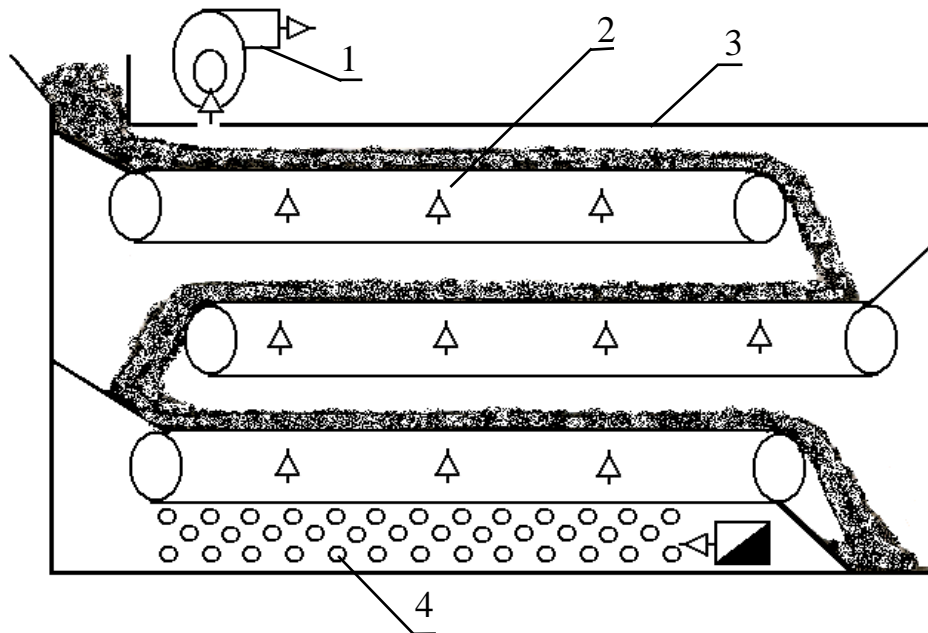


Рис.17. Схема стрічкової сушарки:
 1 – вентилятор; 2 – стрічковий транспортер;
 3 – сушарка; 4 – калорифер

Петльова сушарка (рис.18) дозволяє сушити пастоподібні матеріали та безкрайні полотна. У сушарках для паст безкрайня гнучка сітчаста стрічка проходить крізь гарячі вальці, які втискають пасту до її вічок. Стрічка з вологим матеріалом потрапляє до сушарки, де створює петлі, які пересуваються конвеєром до розвантажувального пристрою. За рахунок обдування вічок сушильним агентом з обох боків такі сушарки мають велику інтенсивність сушіння, але вони досить складні та вимагають підвищених енерговитрат.

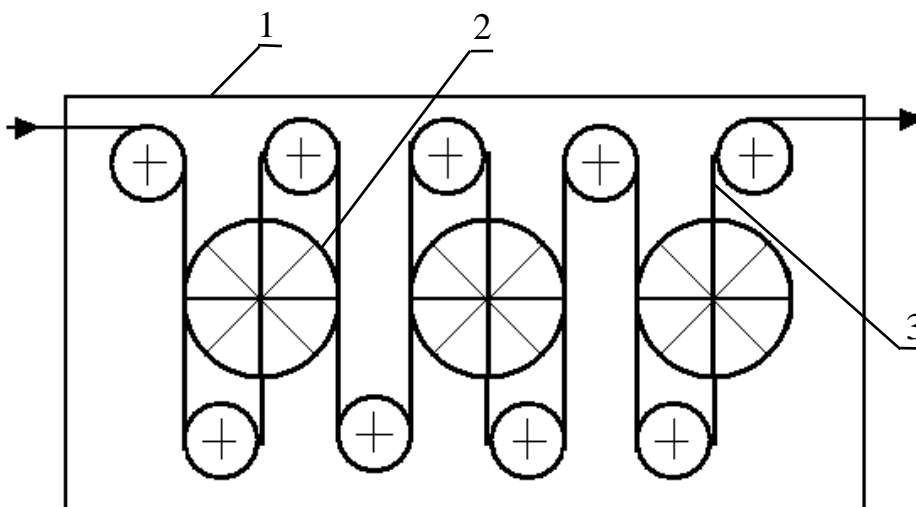


Рис. 18. Схема петльової сушарки:
 1 – камера; 2 – вентилятор; 3 – стрічка

Барабанна сушарка (рис. 19) призначена для сушіння дисперсних твердих матеріалів. Вона забезпечує безперервне змішування та добрий контакт з сушильним агентом завдяки обертанню сушарки. Оскільки вісь барабана нахилена до горизонту під кутом $3...6^{\circ}$, матеріал пересипається від завантажувального бункера до розвантажувального. Залежно від розміру та липучості висушуваного матеріалу у середині монтується насадка. Вона може бути підйомно-лопатевою (призначеною для велико кускових матеріалів); секторною (призначеною для мало сипких важких матеріалів); перевалюючою (призначеною для добре сипких матеріалів).

Недолік цієї сушарки – винесення дрібнодисперсних матеріалів разом з відпрацьованим сушильним агентом, підвищена витрата електроенергії та необхідність ущільнення між барабаном і вантажним й розвантажувальними бункерами.

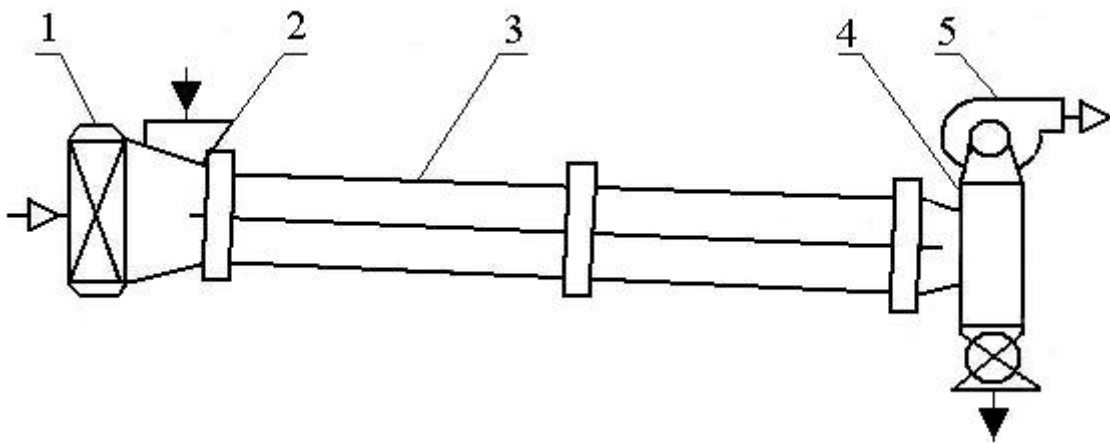


Рис.19. Схема барабанної сушарки:

- 1 – калорифер; 2 – навантажувальний бункер;
- 3 – барабан; 4 – розвантажувальний бункер;
- 5 – вентилятор

Сушарки киплячого шару (рис. 20) забезпечують найвищу інтенсивність сушіння диспергованих сипких матеріалів завдяки якісному обдуванню кожної частинки матеріалу сушильним агентом. У ній гарячий сушильний агент, підігрітий калорифером 3, подається витяжним вентилятором 1 крізь решітку 2. Швидкість подачі газу така, що диспергований матеріал «кипить», тобто перебуває у псевдорідинному стані. Для забезпечення рівномірного «кипіння» та зниження винесення основної фракції частин матеріалу корпус сушарки розширюється від низу до верху. З метою утримання дрібної фракції відпрацьований сушильний агент проходить циклон чи рукавний фільтр. Основним недоліком сушарки є підвищена витрата електроенергії.

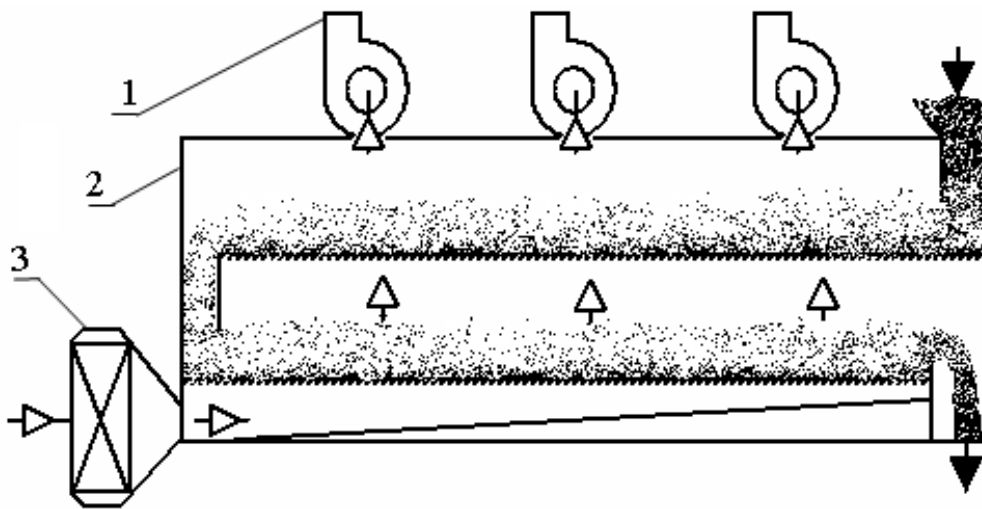


Рис. 20. Схема сушарки киплячого шару

Розпилююча сушарка (рис. 21) призначена для сушіння рідин (розчинів солей, суспензій, емульсій). Сушильний агент потрапляє до камери 4, де розпилюється розпилювачем 3. Дисперговані краплі осаджуються дотолу, висихаючи при цьому. Такі умови створюють велику площу поверхні контакту рідини з сушильним агентом. Завдяки цьому сушіння йде надзвичайно швидко. В решті решт виробляється тонко дисперсний продукт високої якості. Великий недолік сушарки – підвищена витрата електроенергії т громіздкість апаратів великої продуктивності.

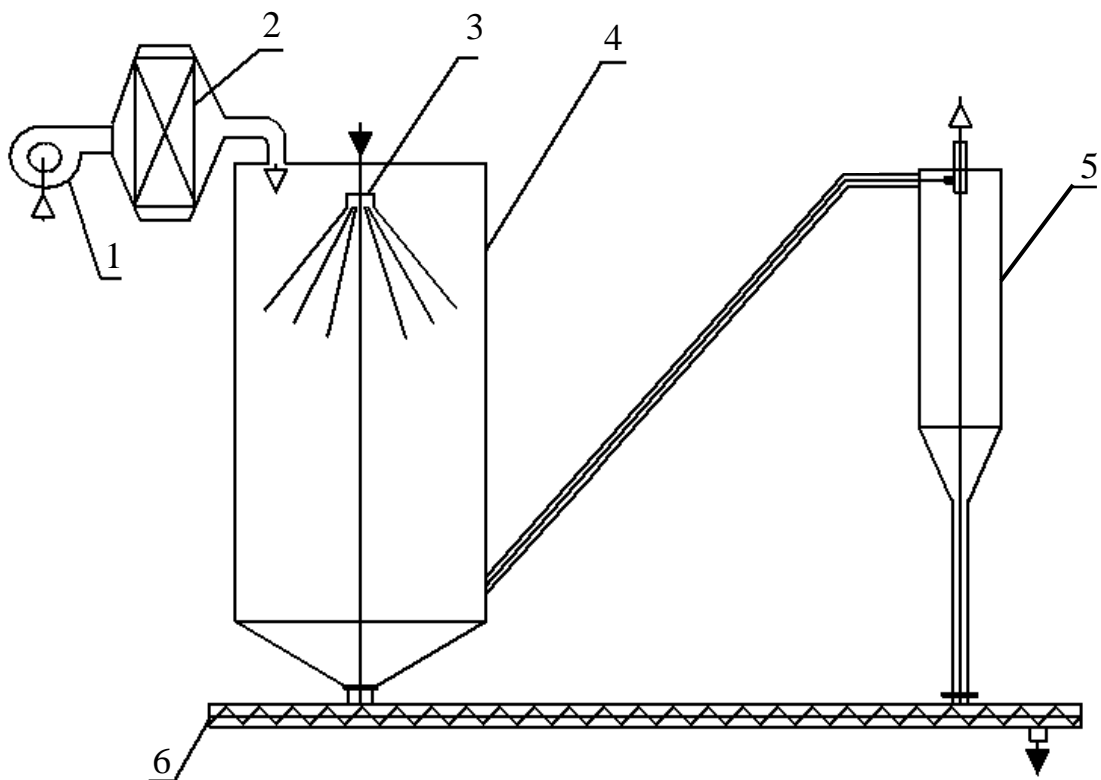


Рис. 21. Схема розпилюючої сушарки:

- 1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – розпилювач;
4 – камера; 5 – циклон; 6 шнековий транспортер

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 9-е изд., пер. и доп. – М.: Химия, 1973. – 754 с.
2. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1976. – 432 с.
3. Сажин Б.С. Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 319 с.

