

**ВІДКРИТИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РОЗВИТКУ ЛЮДИНИ «УКРАЇНА»
ІНЖЕНЕРНО –ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ**

КАФЕДРА СУЧАСНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЙ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ З КУРСУ
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ»**

Київ 2022

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СУШІННЯ

Сушіння – це процес видалення частки вологи із твердих або пастоподібних речовин шляхом випаровування за рахунок підвищення теплової енергії і відведення утвореної пари.

Метою процесу сушіння є поліпшення якості матеріалів і надання їм необхідних властивостей (зниження об'ємної маси, підвищення міцності, зменшення злипання добрив тощо).

За способом підведення теплової енергії до матеріалу, який сушиться, розрізняють такі способи сушіння:

- конвективне сушіння – шляхом безпосереднього контактування матеріалу з сушильним агентом, в якості якого використовують нагріте повітря або паливні гази в суміші з повітрям;
- контактне сушіння – шляхом передачі енергії від нагрітої поверхні до матеріалу;
- радіаційне сушіння – шляхом передачі теплової енергії інфрачервоними променями;
- діелектричне сушіння – шляхом нагрівання матеріалу в полі струму високої частоти;
- сублімаційне сушіння – сушіння в замороженому стані при глибокому вакуумі.

Найбільш поширені в хімічній промисловості конвективне і контактне сушіння.

При будь-якому способі сушіння матеріал, який сушиться, безпосередньо контактує з вологим газом. При конвективному сушінні вологому газу відводиться основна роль у процесі, тому знання властивостей вологого газу є необхідністю при розгляданні процесів сушіння і їх розрахунках.

1.1. Основні властивості вологого газу

Вологий газ характеризується низкою параметрів, таких як: абсолютна та відносна вологість, густиною пари вологи і густиною насиченої пари вологи, парціальним тиском вологи та тиском насиченої пари вологи, вологовмістом та тепловмістом, температурою, температурою точки роси та температурою мокрого термометра.

Розглянемо кожну із названих вище характеристик.

1.1.1. *Абсолютною або об'ємною вологістю газу* називається маса пари будь-якої рідини, що міститься в 1 м^3 вологого газу. Об'єм пари рідини дорівнює об'єму вологого газу і тому абсолютна вологість газу дорівнює густині пари рідини ρ_n при температурі газу та її парціальному тиску в газі p_n .

1.1.2. *Відносною вологістю* або ступенем насиченості газу вологою φ називається відношення маси пари вологи, що міститься в 1 м^3 вологого газу ρ_n , при даних умовах (температурі і загальному барометричному тиску) до максимально можливої маси пари вологи в 1 м^3 газу (густина насиченої пари) при тих же умовах:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n^*} \quad (1.1)$$

Відповідно до рівняння стану ідеальних газів можна записати:

$$n \frac{p_n \cdot M_n}{RT} = n \frac{p_n \cdot M_n}{RT} \quad (1.2)$$

де T – температура; К; M_n – молярна маса пари, кг/кмоль; R – універсальна газова стала, Дж/кмоль·К; p_n – тиск насиченої пари при даній температурі і загальному барометричному тиску, Па; p_n – парціальний тиск пари вологи в газі, Па.

Порівнявши (1.1) і (1.2), маємо:

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n} = \frac{p_n}{p_n} \quad (1.3)$$

Нагадаємо, що парціальним тиском p_n будь-якого газу в суміші його і іншими газами називається тиск, під яким знаходився б цей газ, якби з суміші були видалені всі інші гази, а об'єм і температура залишалися б попередніми.

Парціальний тиск насиченої пари p_n або тиск насиченої пари при даній температурі t відповідає максимально можливому вмісту пари в газі, вище якого спостерігається її конденсація.

Якщо в якості газу використовується повітря, а в якості вологи – вода, то можливі два випадки розрахунку відносної вологості повітря. В першому випадку, коли температура повітря нижче або дорівнює температурі насичення, відповідній загальному тиску, то максимально можливий тиск водяної пари дорівнює тиску сухої насиченої пари, який можна визначити із Міжнародних таблиць водяної пари при заданій температурі повітря (таблиця 1, додаток).

У другому випадку, коли температура повітря вища температури насичення, то максимально можливий тиск водяної пари дорівнює загальному або барометричному тиску B . У цьому випадку:

$$\varphi = \frac{p_n}{B} \quad (1.4)$$

Відносна вологість φ є однією із найважливіших характеристик газу, який використовується в якості сушильного агента. Вона визначає його вологомісткість, тобто властивість газу сприймати пару вологи.

Тиск насиченої пари будь-якої вологи часто визначають за імперичними формулами. Найбільш поширеною із них є формула Антуана:

$$p_n = 133,3 \exp \left(\frac{A - T}{T + C} \right), \text{ Па}, \quad (1.5)$$

де A , B , C – константи, характерні для даного виду вологи (табл. 2, додаток); T – температура пари, К.

Якщо тиск насиченої пари відомий, або його можна розрахувати, то при відомій відносній вологості газу можна визначити парціальний тиск пари в ньому із рівняння (1.3):

$$p_n = \varphi \cdot p_n \quad (1.6)$$

Приклад 1.1. Визначити тиск насиченої пари етилового спирту при температурі 78°C .

Розв'язання. Тиск насиченої пари етилового спирту визначимо за формулою (1.5). Константи A , B і C знаходимо за таблицею 2 (додаток):

$$A = 18,9119, \quad B = 3803,98, \quad C = -41,68.$$

Абсолютна температура етилового спирту:

$$T = t + 273 = 78 + 273 = 351 \text{ К.}$$

Після підстановки цих даних в (1.5), знайдемо:

$$p_n = 133,3 \exp \left| \frac{18,9119 - 351}{351 + 41,68} \right| = 99400 \text{ (Па)}.$$

Приклад 1.2. Визначити парціальний тиск вологи в газі, якщо тиск насиченої пари становить 2 кПа, а відносна вологість – 10%.

Розв'язання. Парціальний тиск вологи в газі визначається за рівнянням (1.6), в яке входять відомі із умов задачі величини: $p_n = 2 \text{ кПа}$; $\varphi = 10\% = 0,1$; тому:

$$p_n = 0,1 \cdot 2 = 0,2 \text{ кПа.}$$

1.1.3. Кількість вологи, що міститься у вологому газі і припадає на 1 кг абсолютно сухого газу, називається його вологовмістом:

$$x = \frac{m_n}{m_{c.g}} = \frac{\rho_n}{\rho_{c.g}} = \frac{M_n}{M_g} \cdot \varphi \cdot \frac{p_n}{P}, \quad (1.7)$$

де m_n і $m_{c.g}$ – маса пари і маса абсолютно сухого газу в даному об'ємі вологого газу, кг; ρ_n і $\rho_{c.g}$ – густини пари вологи та абсолютно сухого газу, відповідно, кг/м³; M_n і M_g – молярні маси вологи і сухого газу, кг/моль; p_n і P – тиск насиченої пари вологи та її парціальний тиск, Па; P – загальний тиск вологого газу.

У тому випадку, коли вологою є вода, а газом – повітря:

$$x = 0,622 \frac{P - \varphi p_n}{\varphi p_n}. \quad (1.8)$$

Якщо загальний тиск пароповітряної суміші не перевищує атмосферного, а її температура більша 100°C, то $p_n = P$ і тоді вологовміст повітря визначається за такою формулою:

$$x = \frac{0,622}{1 - \varphi}. \quad (1.9)$$

Приклад 1.3. Визначити вологовміст повітря при його відносній вологості $\varphi = 90 \%$, загальному тиску $P = 0,05$ МПа і температурі $t = 30^\circ\text{C}$.

Розв'язання. Вологовміст повітря визначається в даному випадку за формулою (1.8.):

$$x = 0,622 \frac{P - p_n}{p_n},$$

де $\varphi = \frac{p_n}{P} = 0,9$; $P = 0,05 \cdot 10^6$ Па – за умовою задачі; p_n – тиск насиченої пари вологи, визначимо за формулою (1.5):

$$p_n = 133,3 \exp \left(\frac{A - T}{T + C} \right).$$

Значення A , B і C знайдемо в таблиці 2 (додатки) для води: $A = 18,3036$; $B = 3816,44$; $C = -46,13$, температура $T = t + 273 = 30 + 273 = 303$ К, тоді:

$$p_n = 133,3 \exp \left(\frac{18,3036 - 303}{303 + 46,13} \right) = 4180 \text{ Па}.$$

Підставивши ці дані у формулу для вологовмісту, маємо:

$$\frac{0,9 \cdot 4180}{0,05 \cdot 10^6 - 4180 \cdot 0,9} \quad \begin{array}{l} \text{кг вологи} \\ \text{кг сух. повітря} \end{array}$$

Приклад 1.4. Визначити вологовміст повітря, якщо його температура $t = 150^\circ\text{C}$ і відносна вологість $\varphi = 50\%$, а загальний тиск $P = 760$ мм рт. ст.

Розв'язання. За формулою (1.9) знаходимо:

$$\frac{0,622 \cdot 0,5}{1 - 0,5} \quad \begin{matrix} \text{кг вологи} \\ \text{кг сух. повітря} \end{matrix}$$

1.1.4. *Ентальпія* (тепловміст) I вологого газу відноситься до 1 кг абсолютно сухого газу і визначається сумою ентальпій сухого газу і пари, яка в ньому знаходиться, за такою формулою:

$$I = c_2 t + x(c_n t + r), \quad (1.10)$$

де I – ентальпія вологого газу, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг сух. газу}}$; t – температура вологого газу, $^{\circ}\text{C}$; c_n і c_p – питомі теплоємності, відповідно, абсолютно сухого газу і пари вологи, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг K}}$, при даних температурі і тиску (табл. 1, додаток).

Якщо повітря наповнене водяною парою то $c_2 = 1,01 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$,

$$c_n = 1,97 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}, r_0 = 2493 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

і тоді

$$I = 1010t + x 1970t + 2493000. \quad (1.11)$$

Приклад 1.5. Визначити ентальпію вологого повітря при температурі 30°C і вологовмісті $0,0505 \frac{\text{кг сух. повітря}}{\text{кг сух. повітря}}$.

Розв'язання. Згідно з формулою (1.11), маємо:

$$I = 1010 \cdot 30 + 0,0505 (1970 \cdot 30 + 2493000) = 1,59 \cdot 10^5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг сух. повітря}}$$

1.1.5 *Температура точки роси* це така температура, при якій газ даного стану, охолоджуючись при сталому вологовмісті, стане насиченим. У цьому випадку $\phi = 1$ і температуру точки роси можна визначити, розв'язавши рівняння (1.5) відносно температури:

$$t_{T.P} = \frac{B}{A - \ln \frac{p_n}{133,3}} - C - 273, \quad (1.12)$$

де $t_{T.P}$ – температура точки роси, $^{\circ}\text{C}$; A , B , C – константи, що характеризують вид вологи (табл. 2, додаток); p_n – тиск насиченої пари вологи при температурі точки роси, Па.

Приклад 1.6. Визначити температуру точки роси для парогазової суміші, яка складається із азоту і пари метилового спирту. Тиск парогазової суміші $0,2 \text{ МПа}$, і вологовміст $x = 0,01 \frac{\text{кг метил. спирту}}{\text{кг сух. повітря}}$.

Розв'язання. Температура точки роси визначиться з рівняння (1.12), в яке входить тиск насиченої пари метилового спирту p_n . Тиск насиченої пари знаходиться з рівняння (1.7) при $\varphi = 1$.

$$P = \frac{x \cdot \Pi}{M_2} + C = \frac{0,01 \cdot 2 \cdot 10^5}{8} + 0,01 = 1735 \text{ Па} .$$

Із таблиці 2 (додатки) для метилового спирту $A = 18,5875$, $B = 3626,55$, $C = -34,29$.

Після підстановки цих даних в (1.12), маємо:

$$t_{T.P.} = \frac{3626,55}{18,5875 - \ln 133,3} + 34,29 - 273 = -12,4^0 \text{ C} .$$

1.1.6. *Температура мокрого термометра* – t_{MT} це така температура, при якій газ, охолоджуючись при сталій ентальпії, стає насиченим, тобто $x=x_n$ і $\varphi=1$.

Температуру мокрого термометра можна визначити шляхом розв'язання системи трансцендентних рівнянь:

$$x_n(t_{MT}) = \frac{\Pi}{\Gamma} \frac{H_{MT}}{\Pi - P_n(t_{MT})} \quad (1.13)$$

$$I = C_{C.G.} \cdot t_{MT} + (C_{\Pi} \cdot t_{MT} + r_O) x_n(t_{MT}),$$

де $x_n(t_{MT})$ – вологовміст насиченого паромою вологи газу при температурі мокрого термометра t_{MT} ; $p_n(t_{MT})$ – тиск насиченої пари вологи при температурі t_{MT} .

У системі рівнянь (1.13) два взаємопов'язаних невідомих $x_n(t_{MT})$ та t_{MT} , тому її розв'язують ітераційним методом, наприклад методом Ньютона [3]. Суть цього методу полягає в тому, що для будь-якого рівняння виду $f(x) = 0$ при відомому наближеному значенні його кореня x_0 більш точне його значення розраховують за формулою:

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}, \quad (1.14)$$

де $f(x_0)$ – величина функції при наближеному значенні її кореня x_0 ; $f'(x_0)$ – величина похідної від функції $f(x_0)$ при тому ж значенні її кореня.

Наступне, більш точне, значення кореня знаходять за тією ж формулою, замінюючи x_0 на x_1 та ін. Таким чином, корінь рівняння може бути визначено з будь-якою точністю.

Щоб розв'язати систему рівнянь (1.13) методом Ньютона перепишемо друге рівняння системи у такому вигляді:

$$f(t_{MT}) = c_{C.G.} \cdot t_{MT} + (c_{\Pi} t_{MT} + r) \cdot x_n(t_{MT}) - 1 = 0, \quad (1.15)$$

а в першому рівнянні тиск насиченої пари вологи $p_n(t_{MT})$ виразимо через t_{MT}

відповідно до формули (1.5):

$$p_H(t_{MT}) = 133,3 \exp \left(A - \frac{27}{t_{MT} + 3 + C} \right) \quad (1.16)$$

Перше наближення t_{MT} можна прийняти за формулою:

$$t_{MT} = \frac{B}{A - \ln 133,3 \cdot 2} - C - 273, \quad (1.17)$$

а далі послідовно розраховують:

$$p_H(t_{MT}) = 133,3 \exp \left(A - \frac{27}{t_{MT_i} + 3 + C} \right),$$

$$p'(t) = p(t) \cdot \frac{B}{t_{MT_i} + 273 + C},$$

$$x_H(t_{MT}) = \frac{\Pi}{\Gamma} \cdot p_H(t_{MT}) / (\Pi - p_H(t_{MT})), \quad (1.18)$$

$$x'_H(t_{MT})_i = \frac{M}{\Gamma} \frac{\Pi}{\Gamma} \cdot p'_H(t_{MT})_i \cdot \Pi / (\Pi - p_H(t_{MT})_i)^2,$$

$$f(t_{MT})_i = c_{\Gamma} \cdot t_{MT_i} + x_H(t_{MT})_i \cdot (c_{\Pi} \cdot t_{H(t_{MT})} + r)^{-1},$$

$$f'(t_{MT})_i = c_{\Gamma} + x'_H(t_{MT})_i \cdot (c_{\Pi} \cdot t_{H(t_{MT})} + r)^{-2} + x_H(t_{MT})_i \cdot c_{\Pi} \cdot$$

Наступні значення t_{MTn} уточнюють за формулою:

$$t_{MTm} = t_{MT(n-1)} - f(t_{MT(n-1)}) / f'(t_{MT(n-1)}). \quad (1.19)$$

Приклад 1.7. Визначити температуру мокрого термометра для парогазової суміші, яка складається із аргону і ацетону. Тиск парогазової суміші $\Pi = 0,1$ МПа, а її ентальпія $I=150$ кДж/кг аргону.

Розв'язання. Із таблиці 2 (додаток) знаходимо сталі для ацетону: $A = 16,6513$, $B = 2940,46$, $C = -35,93$, а також фізичні константи складових парогазової суміші

$$c_{\Pi} = 1181, \text{ кДж} \cdot \text{К}^{-1} \text{ – теплоємність пари ацетону,}$$

$$c_{\Gamma} = 530, \text{ кДж} \cdot \text{К}^{-1} \text{ – теплоємність аргону,}$$

$$r_0 = 565700, \text{ кДж} \cdot \text{К}^{-1} \text{ – прихована теплота конденсації ацетону,}$$

$M_r = 39,9$ – молярна маса аргону,
кмоль

$M_n = 58,1$ – молярна маса ацетону.
кмоль

Зважаючи, що ітераційний метод розрахунку досить трудомісткий, доцільно провести його за допомогою ПЕОМ. Програма розрахунку:

Вихідні дані

$$t_{m.m} = \frac{B}{A - \ln 133,3} - C - 273,$$

ps= 10E5; I=150000; m = 39,9; m_n = 58,1;

A = 16,6513; B= 2940,46; C= -35,93; r₀= 565700; c_д = 530; c_п = 1181.

Розрахунок

Do

$$P_{mt} = 133,3 \cdot \exp(A - B/(t_{mt} + 273 + C))$$

$$P_{mt} = P_{mt} \cdot B / (t_{mt} + 273 + c)^2$$

$$X_{mt} = m_n / m \cdot P_{1mt} / (ps - P_{mt})$$

$$X_{1mt} = \frac{P_{mt}}{m} \cdot \left(\frac{ps - P_{mt}}{ps - P_{mt}} \right)^2$$

$$f_{mt} = C_d \cdot t_{mt} + X_{mt} \cdot C_{п} \cdot t_{mt} + r - I$$

$$f_{1mt} = C_d + X_{1mt} \cdot C_{п} \cdot t_{mt} + r + X_{mt} \cdot C_{п}$$

$$t_{mt} = t_{mt} - f_{mt} / f_{1mt}$$

$$\text{LoopwhileABS} (f_{t_{mt}} / f_{1t_{mt}}) > 0,$$

PRINT t_{mt} .

Розшифровка операторів

t_{MT} – температура мокрого термометра, °C;

ps – тиск парогазової суміші, Па;

I – тепловміст парогазової суміші, Дж/кг .сух. газу;

m – молярна маса аргону, кг/кмоль;

m_n – молярна маса ацетону, кг/кмоль;

C_д – теплоємність аргону, Дж/кг·К;

C_п – теплоємність пари ацетону, Дж/кг·К ;

r – прихована теплота конденсації ацетону, Дж/кг.

У результаті реалізації цієї програми на ПЕОМ одержимо:

$$t_{MT} = 9,1^\circ\text{C}, P_H(t_{mt}) = 14715 \text{ Па}, X_H(t_{mt}) = 0,252 \text{ кг ацетону}.$$

Приклад 1.8. Визначити температуру мокрого термометра, тиск насиченої пари вологи при цій температурі та вологовміст насиченої пари

вологи при температурі мокрого термометра для парогазової суміші, яка складається із повітря і водяної пари. Тиск пароповітряної суміші $P=99308,5$ Па, а її тепловміст $I=140000$ Дж/кг.

Розв'язання. Для визначення невідомих параметрів можна скористуватися діаграмою I-x вологого повітря. Для цього знаходимо ізоентальпу $I=140$ кДж/кг і спускаємося по ній до перетику з лінією $\phi=100\%$. Через точку А перетину проходить ізотерма $t=37,5^\circ\text{C}$ – це й буде температура мокрого термометра, тобто $t_{\text{MT}}=37,5^\circ\text{C}$. Із точки А опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис і

знаходимо $x_{\text{tmt}} = 0,041$ кг сух.повітря. Точка перетину цього перпендикуляра

з лінією парціального тиску визначає тиск насиченої пари при температурі t_{MT} . Отже $p_{\text{MT}} = 6200$ Па.

Розв'яжемо цю задачу аналітичним методом за допомогою ПЕОМ, користуючись вище наведеною програмою. Для цього в таблиці 2 (додатки) знаходимо: $A = 18,3036$, $B = 3816,44$, $C = -46,13$, $M_{\text{H}} = 18$ кг/кмоль,

$M_{\text{T}} = 29$ кг/кмоль, $c_{\text{H}} = 1970$ кг К, $c_{\text{T}} = 1010$ кг К, $r_0 = 2493000$ кг.

Результати розрахунку:

$$t_{\text{MT}} = 36,5^\circ\text{C}, x_{\text{H}(t_{\text{MT}})} = 0,04 \text{ кг сух.повітря}, P_{\text{H}(t_{\text{MT}})} = 6,05\text{кПа}.$$

Порівнюючи результати цих розрахунків, приходимо до висновку, що результати майже співпадають, але розрахунок на ПЕОМ точніший.

1.1.7. Питомий об'єм вологого газу віднесений до 1 кг сухого газу, $V_{\text{вол.газ}}$ (м³/кг) визначається із рівняння стану ідеальних газів:

$$V_{\text{вол.газ.}} = \frac{R}{M_{\text{T}}(P - \phi p_{\text{H}})}, \quad (1.20)$$

де $R= 8314$ Дж/кмоль·К – універсальна газова стала.

Приклад 1.9. Визначити питомий об'єм вологого повітря, який припадає на 1 кг сухого газу, якщо температура вологого повітря $t = 30^\circ\text{C}$, відносна вологість $\phi=75\%$, загальний тиск $P = 0,0981$ МПа (1 кг/см²), тиск насиченої пари вологи $p_{\text{H}}=0,0433$ кг/см².

Розв'язання. Скористаємося формулою (1.20):

$$V_{\text{вол.газу}} = \frac{8314 \cdot (273 + 30)}{29 \cdot (1 - 0,75 \cdot 0,0433)} \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{ м}^3 \text{ кг сух.повітря}$$

Вологовміст X , кг/кг сух. повітря

Рис 1.1 Діаграма Рамзіна для вологого повітря

1.1.8. Зв'язок між основними параметрами вологого повітря (t , x , I , ϕ , p_p , $t_{т.р.}$, t_{MT}) можна зобразити графічно у вигляді діаграми I - x . (діаграма Л.К. Рамзіна) (рис 1.1).

За допомогою цієї діаграми з достатньою для практичних розрахунків точністю вирішуються балансові задачі процесів конвективного сушіння нагрітим повітрям і паливними газами.

Щоб скористатися діаграмою I-x вологого повітря необхідно знати будь-які два його параметри, за якими на діаграмі знаходять точку А, а потім всі останні параметри.

1.2. Характеристики вологого матеріалу

Вологий матеріал, як об'єкт сушіння характеризується вологістю ω або вологовмістом ω^C .

Вологістю називається відношення маси води m_B , яка знаходиться у вологому матеріалі, до загальної маси вологого матеріалу m_{BM} і виражається у відсотках або в долях:

$$\omega = \frac{B}{B M} \cdot 100\% , \quad (1.21)$$

або

$$\frac{m_B \text{ кг води}}{m_{BM} \text{ кг волог. матер.}}$$

Вологовмістом називається відношення маси води m_B , що міститься у вологому матеріалі до маси абсолютно сухого матеріалу $m_{C.M.}$:

$$\omega^C = \frac{B}{C . M .} \cdot 100\% , \quad (1.23)$$

або

$$\frac{C \quad m_B \quad \text{кг води}}{m_{C.M.} \quad \text{кг сух. матер.}} , \quad (1.24)$$

Вологість і вологовміст взаємопов'язані наступними співвідношеннями:

$$\omega = \frac{\omega^C}{1 + \omega} ,$$

або

$$\omega = \frac{\omega^C}{100 + \omega} \cdot 100\% , \quad (1.25)$$

$$\omega^C = \frac{\omega}{1 - \omega} ,$$

або

$$\omega^C = \frac{\omega}{100 - \omega} \cdot 100\% , \quad (1.26)$$

На відміну від вологості вологовміст може приймати значення більше 1 або більше 100%.

Якщо вологий матеріал контактує з вологим газом і при цьому парціальний тиск пари вологи над матеріалом p_m дорівнює парціальному тиску вологи p_n у газі, то в цьому випадку матеріал буде мати граничну вологість ω_p , яка називається рівноважною.

Рівноважну вологість встановлюють експериментальним шляхом.

Приклад 1.10. Визначити вологовміст матеріалу, який має вологість 60%.

Розв'язання. Відповідно до формули (1.26), знаходимо:

$$c = \frac{60}{100 - 60} \cdot 100 = 150\%.$$

Приклад 1.11. Вологий матеріал містить 280 г вологи на 1 кг сухої основи. Визначити вологість матеріалу.

Розв'язання. Відповідно до формули (1.22) знаходимо:

$$\frac{0,280}{1 + 0,28} \quad \begin{array}{l} \text{кг вологи} \\ \text{кг волог.матер.} \end{array}$$

2. МАТЕРІАЛЬНІ ТА ТЕПЛОВІ РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ

2.1. Матеріальні розрахунки

Загальний матеріальний баланс сушарки має вигляд:

$$G_1 = G_2 + W, \quad (2.1)$$

де G_1 і G_2 – відповідно вихідна і кінцева витрата матеріалу, що сушиться, кг/с; W – витрата видаленої із матеріалу вологи, кг/с.

Матеріальний баланс сушарки за абсолютно сухим матеріалом:

$$G_1 \frac{100 - \omega_1}{100} = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100} \quad (2.2)$$

де ω_1 і ω_2 – вихідна та кінцева вологість матеріалу, %.

Розв'язуючи сумісно рівняння (2.1) і (2.2) знаходимо: кількість вологого матеріалу при відомих продуктивності сушарки з сухого матеріалу і вихідній та кінцевих вологостях або вологовмістах:

$$G = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1} = G_2 \frac{100 + \omega_1}{100 + \omega_2}; \quad (2.3)$$

кількість сухого матеріалу при відомих продуктивності сушарки з вологого матеріалу і вихідних та кінцевих вологостях або вологовмістах:

$$G = G_2 \frac{100 - \omega_1}{100 + \omega_2} = G_2 \frac{100 + \omega_1}{100 - \omega_2}; \quad (2.4)$$

кількість видаленої із матеріалу вологи:

$$W = G_1 - G_2 = G_1 \frac{100 - \omega_2}{100 + \omega_1} = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100 + \omega_1} = G_1 \frac{100 - \omega_2}{100 + \omega_1} = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100 + \omega_1} \quad (2.5)$$

Приклад 2.1. Визначити масу абсолютно сухого матеріалу в 100 кг вологого матеріалу, якщо його вологовміст складає 40%.

Розв'язання. Згідно з формулою (2.4) знаходимо:

$$G_2 = G_1 \frac{100}{100 + \omega_1};$$

В абсолютно сухому матеріалі вологовміст $\omega_2^c = 0$, тоді:

$$G_{a.c.m.} = G_1 \frac{100}{100 + 40} = 100 \frac{100}{100 + 40} = 71,4 \text{ кг}$$

Приклад 2.2. Визначити витрату вологи, яка видаляється із вологого матеріалу при його сушінні від 40 до 1,5% вологовмісту, якщо продуктивність сушарки з вологого матеріалу становить 5 т/годину.

Розв'язання. Кількість видаленої води знаходиться за формулою (2.5)

$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 + \omega_1} = 5 \cdot \frac{40 - 1,5}{100 + 40} = 1,375 \text{ години}.$$

Приклад 2.3. Визначити продуктивність сушарки з сухого матеріалу за умовами прикладу 2.2.

Розв'язання. Згідно з формулою (2.4) маємо:

$$G_2 = G_1 \frac{100}{100 + \omega_1} = 5 \cdot \frac{100}{100 + 40} = 3,625 \text{ години}.$$

2.2. Матеріальний баланс сушарки з вологи в газовому середовищі:

$$Lx_0 + W = Lx_2, \quad (2.6)$$

де Lx_0 – кількість вологи, яка вноситься в сушарку із свіжим газом, кг/с;

W – кількість вологи, яка видаляється із вологого матеріалу в газове середовище, кг/с; Lx_2 – кількість вологи, яка видаляється із сушарки з відпрацьованим газом, кг/с; L – витрата абсолютно сухого газу, кг/с; x_2 і x_0 – вологовміст газу відповідно при його вході в сушарку та на виході з неї, кг вологи/кг сухого газу.

Розв'язуючи рівняння (2.6) відносно витрати абсолютно сухого газу, маємо:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}. \quad (2.7)$$

Питома витрата абсолютно сухого газу на видалення із матеріалу 1 кг вологи:

$$l = \frac{W}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (2.8)$$

Витрата вологого газу L_B на сушіння матеріалу визначається за формулою:

$$L_B = L (1 + x) \quad (2.9)$$

Приклад 2.4. Визначити питому і повну витрату абсолютно сухого повітря в сушарці, продуктивність якої за видаленою вологою становить $W = 0,1$ кг/с. Вологовміст повітря перед сушаркою $x_0 = 0,01$ кг води/кг сух. повітря, а після неї $x_2 = 0,03$ кг води/кг сух. повітря.

Розв'язання. Питома витрата повітря визначається за формулою (2.8).

$$l = \frac{x_2 - x_0}{0,03 - 0,01} = \frac{I}{\text{кг повітря}} \cdot \frac{I}{\text{кг води}}$$

Повна витрата сухого повітря визначається за формулою (2.7):

$$L = \frac{l}{x_2 - x_0} \cdot W = 50 \cdot 0,1 = 5 \text{ кг/с}$$

Приклад 2.5. Визначити витрату вологого повітря перед сушаркою і після неї за умовами прикладу 2.4.

Розв'язання. Витрата вологого повітря перед сушаркою і після неї визначається за формулою (2.9):

$$L_{e,0} = L (1 + x_0) = 5 (1 + 0,01) = 5,05 \text{ кг/с}$$

$$L_{e,2} = L (1 + x_2) = 5 (1 + 0,03) = 5,15 \text{ кг/с}$$

2.3. Теплові розрахунки

2.3.1. Визначення кількості тепла в калорифері та сушарці

Тепловий потік Q (в кВт), який передається газу в калорифері при нормальному сушильному варіанті (послідовне сполучення калорифера та сушильної камери без рециркуляції відпрацьованого повітря) визначається за такою формулою:

$$Q = L (I_1 - I_0) \quad (2.10)$$

де I_0 та I_1 – питомі тепловмісти сухого газу відповідно на вході в калорифер і на виході із нього, кДж/кг сух.газу; L – витрата сухого газу, кг/с.

Рівняння теплового балансу всієї установки, що працює за нормальним сушильним варіантом:

$$Q = L (I_2 - I_0) + \Sigma Q_{BT} \quad (2.11)$$

де ΣQ_{BT} – сумарні втрати тепла в навколишнє середовище, на нагрівання матеріалу та можливих транспортних засобів, кВт.

Витрата теплоти в теоретичній сушарці Q_T для якої можна прийняти $\Sigma Q_{BT} = 0$:

$$Q_T = L (I_2 - I_0) \quad (2.12)$$

Приклад 2.6. Визначити витрату тепла в калориферах двокамерної сушарки з проміжним підігрівом повітря між камерами, витрата якого становить $L = 5$ кг/с, а тепловміст змінюється від $I_0=40$ кДж/кг до $I_1=120$ Дж/кг в основному калорифері і від $I_3=110$ кДж/кг до $I_4=170$ кДж/кг у додатковому калорифері.

Розв'язання. Витрата тепла в основному та додатковому калориферах визначиться за формулою (2.10).

Для основного калорифера маємо:

$$Q_K = L(I_1 - I_0) = 5(120 - 40) = 400 \text{ кВт.}$$

Для додаткового калорифера:

$$Q_K = L(I_4 - I_3) = 5(170 - 110) = 300 \text{ кВт.}$$

2.3.2. Питомі витрати теплоти.

Питома витрата теплоти в $\frac{\text{кВт}}{\text{кг видаленої вологи}}$:

– для реальної сушарки з урахуванням витрат теплоти:

$$q = \frac{W}{x - x_0} = l(I_1 - I_0); \quad (2.13)$$

– для теоретичної сушарки:

$$\frac{I_2 - I_0}{x - x_0} \quad (2.14)$$

Різниця питомих витрат теплоти в реальній і в теоретичній сушарці називається внутрішнім тепловим балансом сушарки.

$$q - q_T = \frac{\cdot}{x - x_0} = \Delta \quad (2.15)$$

$$\text{або } \Delta \sum \frac{Q_{BT}}{W} = (q_M + q_T + q_{BT}) - (q_D + c_B \theta_1), \quad (2.16)$$

де c_B – теплоємність вологи, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

θ_1 – температура матеріалу при вході в сушарку, $^{\circ}\text{C}$;

$q_D = \frac{W}{W}$ – питома витрата теплоти у додатковому калорифері,

розташованому безпосередньо в сушильній камері, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

Q_D – витрата теплоти у додатковому калорифері, кДж;

$q_M = \frac{G_2 \cdot c_M \theta_2 - \theta_1}{W}$ – питома витрата теплоти на нагрівання

матеріалу від температури θ_1 до θ_2 , кДж/кг;

G_2 – продуктивність сушарки за сухим матеріалом, кг/с;

C_M – теплоємність сухого матеріалу, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

$q_T = \frac{G_T (t_{TK} - t_{TP})}{G_T}$ – питома витрата теплоти на нагрівання транспортних

засобів від температури t_{TP} до t_{TK} ;

G_T – маса транспортних засобів, що подають матеріал у сушарку, кг/с ;

C_T – теплоємність матеріалу транспортних засобів, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

$q_{BT} = \frac{Q_{BT}}{G_T}$ – питома витрата теплоти у навколишнє середовище,

кДж/кг ;

Q_{BT} – витрата теплоти у навколишнє середовище, кДж ;

W – продуктивність сушарки за видаленою вологою, кг/с .

Відношення питомої теплоти пароутворення води r при температурі мокрого термометра до питомої витрати теплоти в реальній сушарці називається термічним коефіцієнтом корисної дії сушарки:

$$l = \frac{r}{q_{BT}}. \quad (2.17)$$

Приклад 2.7. Обчислити величину внутрішнього теплового балансу сушарки з киплячим шаром матеріалу за наступними даними:

– продуктивність сушарки з сухого матеріалу $G_2 = 0,18 \text{ т/годину}$;

– температура матеріалу: на вході в сушарку $\theta_1 = 18^\circ\text{C}$; на виході із сушарки $\theta_2 = 98^\circ\text{C}$;

– теплоємність сухого матеріалу $C_M = 2,5 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

– продуктивність сушарки за видаленою із матеріалу вологою $W = 0,01 \text{ кг/с}$;

– витрати теплоти у навколишнє середовище в 2 рази менше теплоти, необхідної для нагрівання матеріалу.

Розв'язання. Оскільки у сушарці з киплячим шаром відсутні: додатковий калорифер і транспортні засоби, то питомі витрати теплоти $q_0 = q_T = q_d = 0$ з урахуванням цього, рівняння (2.16) приймає вигляд:

$$\Delta = (q_M + q_{BT}) - c_B \theta_1.$$

За умовами задачі $q_{BT} = \frac{q}{2}$, тоді

$$\Delta = \frac{q}{2} - c_B \theta_1,$$

$$q_M = W C_M (\theta_2 - \theta_1) = 3600 \cdot 0,01 (98 - 18) = 1000 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

$$c_B \theta_1 = 4,19 \cdot 18 = 75,42 \text{ кг} \cdot \text{К} ,$$

де $c_B = 4,19 \text{ кг} \cdot \text{К}$ – теплоємність води.

$$\text{Отже, } \Delta = \frac{1000 - 75,42}{2} = 462,29 \text{ кДж} .$$

3. ОСНОВНІ СХЕМИ СУШИЛЬНИХ УСТАНОВОК І ЗОБРАЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ В НИХ НА ДІАГРАМІ СТАНУ ПОВІТРЯ І-х

Для забезпечення заданих умов процесу сушіння використовують різні варіанти, схеми яких, зображені на діаграмі І-х, розрахунки розглянуті нижче.

3.1. Нормальний сушильний варіант

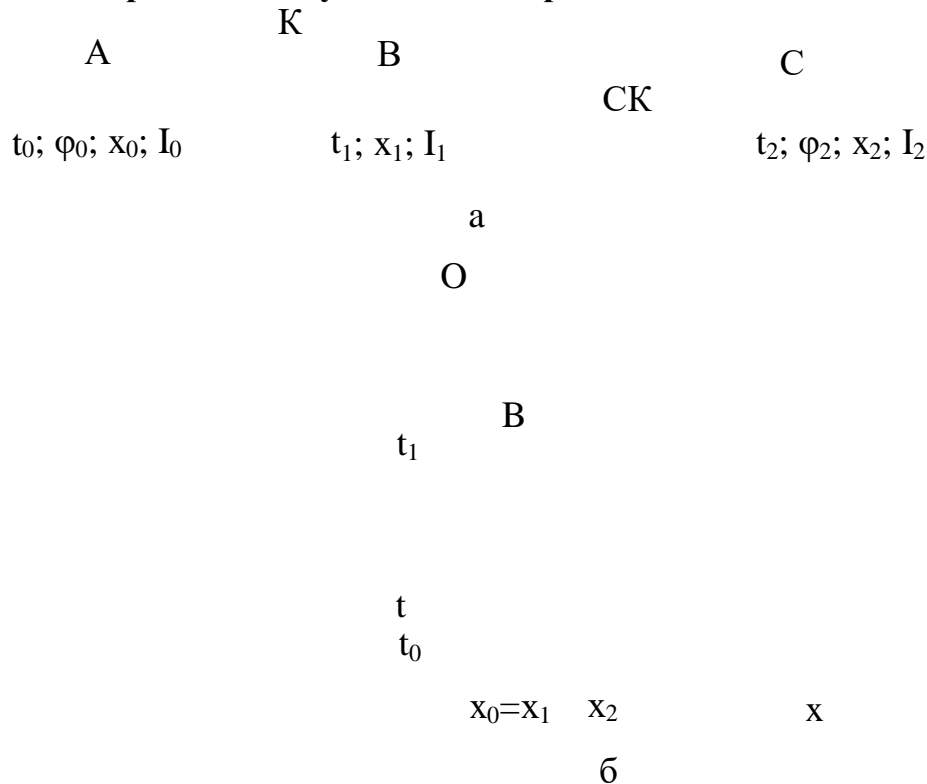


Рис 3.1. Нормальний сушильний варіант: а – схема установки; б – зображення процесу сушіння на діаграмі І-х

Основні розрахунки процесу сушіння за цим варіантом розглянуто у попередньому розділі.

Визначити витрати сушильного агента та теплоти можна більш простим і наочним методом за допомогою діаграми І-х вологого повітря. Нагрівання повітря в калорифері К (рис. 3.1,а) від вихідних параметрів (t_0, φ_0) або (x_0, I_0) до кінцевого етапу або, що одне й теж саме, до початкового стану у сушильній камері (t_1, I_1, x_1) зображається на діаграмі І-х вертикальною лінією АВ (рис. 3.1,б), так як вологовміст газу в калорифері не змінюється, тобто $x_0 = x_1 = \text{const}$.

Отже, нагрівання газу у калорифері або його охолодження у холодильнику зображається на діаграмі I–x лінією постійного вологовмісту.

Під час сушіння змінюються всі параметри, що характеризують стан газу. Зокрема, зміна тепло- і вологовмісту виражається рівнянням (2.15), яке можна записати у більш загальному вигляді:

$$I = I_1 + \Delta = I_1 + \Delta (x - x_0). \quad (3.1)$$

Рівняння (3.1) називається робочою лінією процесу сушіння. На діаграмі I–x – це пряма, яка залежно від величини Δ може займати положення BC (при $\Delta=0$), BC₁ (при $\Delta > 0$) і BC₂ (при $\Delta < 0$). (рис. 3.1,б).

Приклад 3.1. Визначити стан повітря при виході його із сушарки, якщо відомо, що при вході в сушарку повітря визначається: тепловмістом $I_1 = 150$ *кг.сух.пов.*, вологовмістом $x_1 = 0,01$ *кг сух.пов.*. На виході із сушарки

відомо: величина внутрішнього теплового балансу $\Delta = -1420$ *кг сух.пов.*

температура відпрацьованого повітря $t_2 = 60^\circ\text{C}$.

Розв'язання. Задачу можна розв'язати двома методами – аналітичним і графоаналітичним за допомогою I–x діаграми.

Аналітичний метод. На виході із сушарки відомий лише один параметр повітря – його температура $t_2=60^\circ\text{C}$. Другий параметр – вологовміст знаходиться при сумісному розв'язанні рівнянь (1.11) і (2.15) відносно вологовмісту x_2 :

$$I_1 - \Delta x_1 - 1010t_2 = 15000 + 1420000 \cdot 0,01 - 1010 \cdot 60 \quad \text{кг вол.}$$

$$1970t_2 + 2493000 - \Delta = 1970 \cdot 60 + 2493000 + 1420000 \quad \text{кг сух. пов.}$$

Отже, стан повітря при виході із сушарки характеризується двома параметрами – температурою t_2 і вологовмістом $x_2 = 0,0258$ *кг сух.пов.*

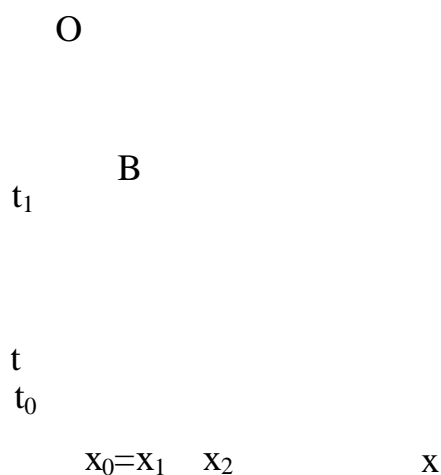


Рис 3.2. До задачі прикладу 3.1

Графоаналітичний метод. За вихідними даними на діаграмі I–x знаходимо точку В (рис. 3.2), як точку перетину ліній $x_1 = 0,01$ *кг/кг* і

$I_1 = 150$ кДж/кг. Щоб знайти точку С, яка характеризує кінцевий стан повітря, скористаємося рівнянням робочої лінії процесу сушіння (3.1). Знайдемо тепловміст повітря про $x = 0$:

$$I(0) = I - \Delta \cdot x_1 = 150 + 1420 \cdot 0,01 = 164,2 \text{ кДж/кг.}$$

Точку Д перетину осі ординат і лінії $I=164,2$ кДж/кг з'єднуємо з точкою В і продовжуємо цю лінію до перетину з ізотермою $t_2=60^\circ\text{C}$. Точка перетину С характеризує стан повітря на виході із сушарки: $I_2=126$ кДж/кг,

$x_2 = 0,0258$ кг сух.пов., $t_2=60^\circ\text{C}$. Лінія ВС відображає процес сушіння матеріалу у сушарці.

Отже результати розрахунку вологовмісту аналітичним і графоаналітичним методами майже співпадають. Графоаналітичний метод менш точний, але наочний і простіший.

3.2. Варіант з частковим підігріванням повітря в сушильній камері

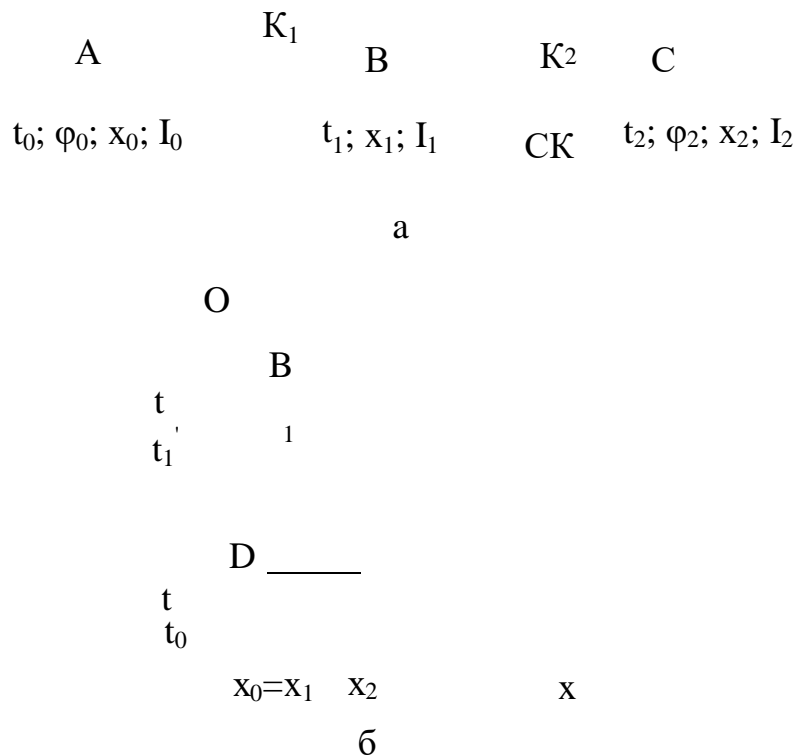


Рис 3.3. Варіант з частковим підігріванням повітря в сушильній камері:
а – схема установки; б – зображення процесу сушіння на діаграмі $I-x$

У цьому варіанті в зовнішньому калорифері K_1 повітря додається лише частка теплоти, а інша частка теплоти додається за допомогою додаткового калорифера K_2 , розташованого безпосередньо у сушильній камері СК (рис. 3.3,а).

На рис. 3.3,б зображено процес сушіння за цим варіантом в теоретичній сушарці.

Загальна кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання повітря

складається із теплоти, що підводиться у основному калорифері K_1 і теплоти, що підводиться до повітря у додатковому калорифері K_2 , тобто:

$$q = \frac{q_{K1}}{x_2 - x_0} + \frac{q_{K2}}{x_2 - x_0} = \frac{q}{x_2 - x_0} \quad (3.2)$$

Із діаграми видно, що $(I_1 - I_0)$ зображається відрізком прямої AB_1 , $(x_2 - x_0) - DC$ і $(I_2 - I_1) - BB_1$.

Отже, можна записати, що:

$$\frac{AB \cdot m_1}{DC \cdot m_x} = \frac{BB \cdot m_1}{DC \cdot m_x} \quad \frac{AB + BB}{DC} = \frac{m_1}{m_x} \quad \frac{AB}{DC} = \frac{m_1}{m_x}$$

де m_1 і m_2 – масштаб відповідно для осей I та x .

Із (3.3) видно, що загальні витрати теплоти і повітря на процес сушіння будуть такі ж самі, як і при нормальному сушильному варіанті. Однак співвідношення між величинами q_{K1} і q_{K2} можуть змінюватися, що на діаграмі відображається пересуванням точки B_1 між точками A і B .

Цей варіант сушіння має перевагу перед нормальним сушильним варіантом, який полягає в тому, що в сушильну камеру повітря поступає з меншою температурою. Це важливо в тому випадку, коли матеріал, що сушиться, має невелику допустиму температуру.

Приклад 3.2. Для сушіння вологого матеріалу, за схемою варіанту з частковим підігріванням повітря в сушильній камері, необхідно визначити витрати сухого повітря і теплоти в кожному калорифері, якщо відомо, що із матеріалу видаляється 100 кг/годину вологи. Максимальна температура нагрівання матеріалу не повинна перебільшувати 70°C , стан повітря визначається такими параметрами: на вході в основний калорифер – $t_0 = 15^\circ\text{C}$; $\phi_0 = 80\%$; на виході із сушарки – $t_2 = 44^\circ\text{C}$; $\phi_2 = 50\%$.

Розв'язання. За допомогою I - x діаграми знаходимо тепловмісти і вологовмісти повітря: перед сушаркою – $I_0 = 40$ *кДж/кг сух.пов.*, $x_0 = 0,009$ *кг сух.пов.*

після сушарки – $I_2 = 122$ *кДж/кг сух.пов.*, $x_2 = 0,03$ *кг сух.пов.*

Питома витрата повітря визначається за формулою (2.8):

$$\ell = \frac{I_2 - I_0}{x_2 - x_0} = \frac{122 - 40}{0,03 - 0,009} = 47,6 \quad \text{кДж/кг вологи}$$

Повна витрата повітря: $L = \ell \cdot W = 47,6 \cdot 100 = 1460$ *кг/годину* = 1,32 *кг/с.*

Повна питома витрата теплоти визначається за формулою (2.12):

$$\frac{I_2 - I_0}{x_2 - x_0} = \frac{122 - 40}{0,03 - 0,009} \quad \text{кДж/кг вологи}$$

На діаграмі I - x знаходимо точку перетину ліній постійного вологовмісту $x_0 = 0,009$ *кг/кг* і ізотерми $t_1 = 70^\circ\text{C}$. Ця точка відповідає кінцевому стану повітря після основного калорифера. Визначаємо тепловміст $I_1 = 95$ *кДж/кг сух.пов.*, тоді

питому витрату тепла в основному калорифері знаходимо за формулою (3.2):

$$q = x_2 - x_0 = 0,03 - 0,009 = 2618 \text{ кг вологи}.$$

Тоді питома витрата тепла у додатковому калорифері:

$$q = q - q_{K1} = 3900 - 2618 = 1282 \text{ кг вологи}.$$

Повні витрати теплоти:

– у основному калорифері:

$$Q_{K1} = q_{K1} \cdot W = 2618 \cdot 1,32 = 3461,5 \text{ кВт};$$

– у додатковому калорифері:

$$Q_{K2} = q_{K2} \cdot W = 1282 \cdot 1,32 = 1695,1 \text{ кВт}.$$

Загальна витрата теплоти:

$$Q = Q_{K1} + Q_{K2} = 3461,5 + 1695,1 = 5156,6 \text{ кВт}.$$

3.3. Варіант з проміжним підігріванням повітря за зонами

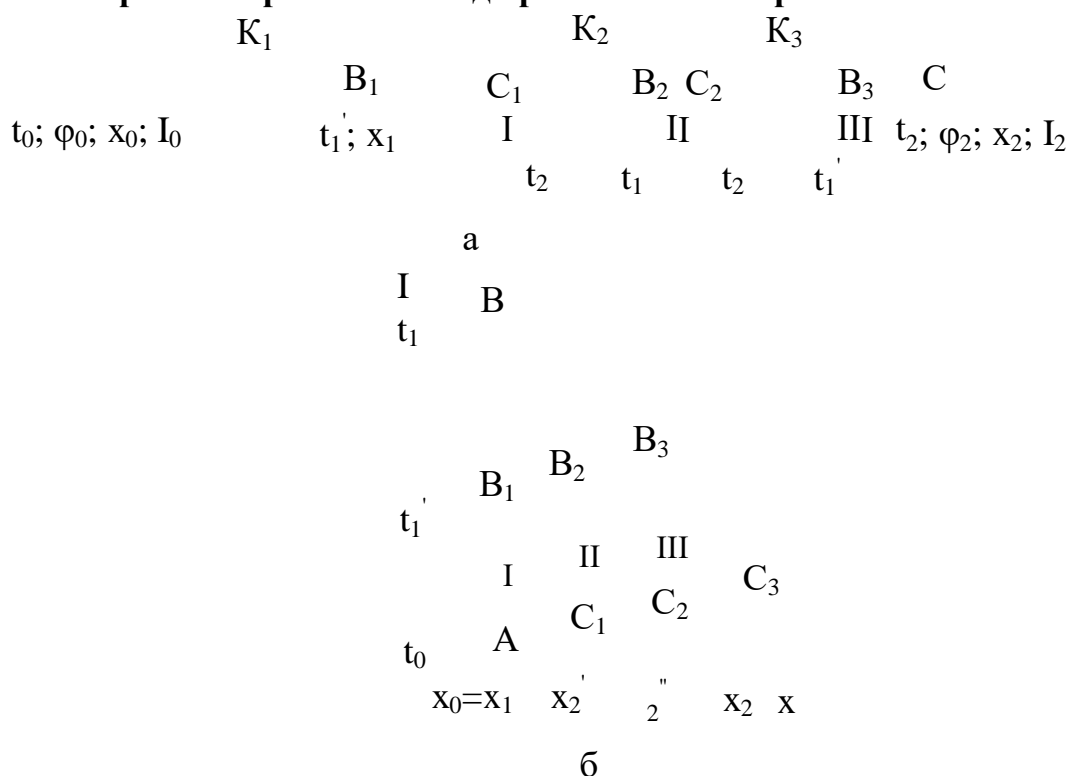


Рис. 3.4. Варіант з проміжним підігріванням повітря за зонами:
а – схема установки; б – зображення процесу сушіння на діаграмі I-x

При розрахунках сушарок, які працюють за цим варіантом, задають верхні та нижні границі температур повітря t₁ та t₂. Сушарки, що працюють за цією схемою, складаються із декількох зон (рис. 3.4,а), в кожній із яких встановлюється калорифер. На діаграмі I-x (рис. 3.4,б) спочатку звичайним шляхом знаходять точку A₁, яка характеризує стан свіжого повітря, потім воно

підігрівається в калорифері K_1 від температури t_0 до t_1 і подається в зону I сушарки. В першій зоні сушарки повітря взаємодіє з вологим матеріалом і охолоджується до температури t_2 , після чого підігрівається в калорифері K_2 і подається в зону II сушарки, де знову взаємодіє з вологим матеріалом, який переходить із зони I у зону II, охолоджується до температури t_2 і т. ін. Кінцеві параметри повітря характеризуються точкою C (рис. 3.4,б).

Таким чином повітря послідовно переходить всі зони сушіння, в кожній з яких процес сушіння здійснюється за основним варіантом. Очевидно, що зміна стану повітря повинна бути ступінчастою – на діаграмі I–x (рис. 3.4,б) він зображається ламаною лінією $AB_1C_1B_2C_2C$. При сушінні за основним варіантом потрібно було б нагрівати повітря до температури t_B , яка суттєво перевищує температуру t_1 – максимально допустиму для цього матеріалу.

Загальна кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання повітря дорівнює сумі теплот, які додають повітрю кожен із калориферів, тобто:

$$q = q_{k1} + q_{k2} + q_{k3} = \frac{G}{x_2 - x_0} + \frac{G}{x_2 - x_0} + \frac{G}{x_2 - x_0} = \frac{3G}{x_2 - x_0} \quad (3.4)$$

Втрата повітря визначається так само, як і при проведенні процесу за основним варіантом.

3.4. Варіант з частковою рециркуляцією відпрацьованого повітря

Схема сушильної установки і зображення процесів, які в ній відбуваються показано на рис 3.5,а і б.

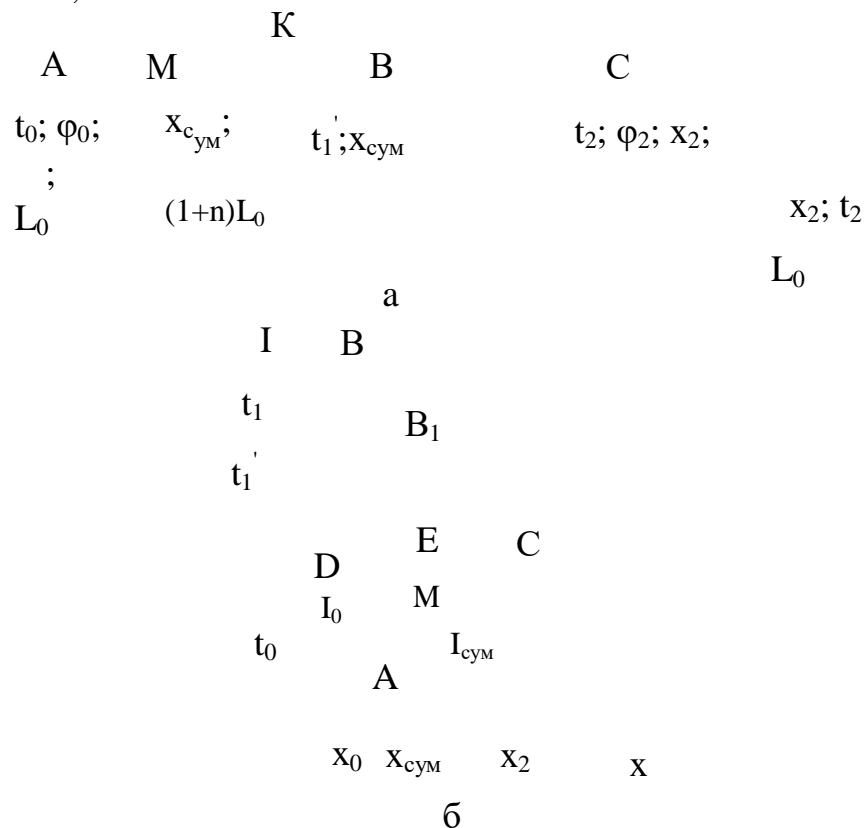


Рис. 3.5. Варіант з частковою рециркуляцією відпрацьованого повітря: а – схема установки; б – зображення процесу на діаграмі I–x

При сушінні за цим варіантом свіже повітря попередньо змішується з часткою відпрацьованого повітря. При змішуванні L_0 кг/годину свіжого повітря з параметрами x_0 і I_0 з L_2 кг/годину відпрацьованого повітря з відомими параметрами x_2 і I_2 знаходять параметри суміші $x_{\text{сум}}$ і $I_{\text{сум}}$ за правилом адитивності:

$$x_{\text{сум}} = \frac{L_0 x_0 + L_2 x_2}{L_0 + L_2}, \quad (3.5)$$

$$I_{\text{сум}} = \frac{L_0 I_0 + L_2 I_2}{L_0 + L_2} \quad (3.6)$$

Якщо позначити відношення $\frac{L_2}{L_0} = n$, тоді:

$$x_{\text{сум}} = \frac{x_0 + n x_2}{1 + n} \quad (3.7)$$

$$I_{\text{сум}} = \frac{I_0 + n I_2}{1 + n} \quad (3.8)$$

Параметр n називається кратністю циркуляції. Сумісне розв'язання рівнянь (3.7) і (3.8) відносно n дають:

$$\frac{x_{\text{сум}} - x_0}{x_2 - x_{\text{сум}}} = n \quad (3.9)$$

$$\frac{I_{\text{сум}} - I_0}{I_2 - I_{\text{сум}}} = n \quad (3.10)$$

$$\frac{x_{\text{сум}} - x_0}{x_2 - x_{\text{сум}}} = \frac{I_{\text{сум}} - I_0}{I_2 - I_{\text{сум}}} \quad (3.11)$$

Рівняння (3.11) на діаграмі I - x зображається прямою лінією AC , яка проходить через точки, що характеризують стан свіжого повітря, суміші і відпрацьованого повітря (рис. 3.5,6). Точка M відповідає стану суміші і поділяє цю пряму на відрізки AM і MC , які знаходяться у співвідношенні

$$\frac{MC}{AM} = \frac{L_2}{L_0} = n.$$

Для теоретичної сушарки при заданих параметрах свіжого і відпрацьованого повітря (точки A і C) і температурі сушіння t положення точки B_1 знаходиться на перетині ліній $I_1 = I_2 = \text{const}$ і ізотерми t_1' . Потім із цієї точки проводять вертикальну лінію до перетину її з прямою AC і знаходять точку M , яка характеризує стан суміші.

Питома витрата свіжого повітря визначається за формулою:

$$l_0 = \frac{L_2}{x_2 - x_0} \quad (3.12)$$

Питома витрата повітряної суміші:

$$l_{\text{сум}} = x_2 - x_{\text{сум}} \quad (3.13)$$

Питома витрата повітря, що циркулює в установці:

$$l_2 = l_{\text{сум}} - l_0 \quad (3.14)$$

Питома витрата теплоти в калорифері становить

$$q_K = l_{\text{сум}} (I_1 - I_{\text{сум}}) = \frac{I_1 - I_{\text{сум}}}{1} \quad (3.15)$$

Із подібності трикутників АВС і МВ₁С витікає, що $\frac{CE}{CD} = \frac{CE}{CD}$, тобто витрата теплоти в даному варіанті буде така ж сама, як і при нормальному сушильному варіанті. Однак у сушарці з частковою рециркуляцією повітря створюються більш м'які умови сушіння, а збільшення кількості повітря, що проходить через сушарку прискорює процес сушіння.

Приклад 3.3. Перед зовнішнім калорифером змішуються у масовому співвідношенні 1:3 (за сухим повітрям) свіже повітря, параметри якого $t_0=25^\circ\text{C}$ і $\varphi_0 = 50\%$ і відпрацьоване повітря, з параметрами $t_2=50^\circ\text{C}$ і $\varphi_2=80\%$. Визначити параметри суміші перед калорифером і після нього, якщо суміш у калорифері нагрівається до температури $t_1=80^\circ\text{C}$.

Розв'язання. За заданими температурою і відносною вологістю знаходимо вологовмісти і тепловмісти: $I_0 = 50 \frac{\text{кг сух.пов}}{\text{кг сух.пов}}$, $I_2 = 228 \frac{\text{кг сух.пов}}{\text{кг сух.пов}}$,

$x_0 = 0,01 \frac{\text{кг сух.пов}}{\text{кг сух.пов}}$ $x_2 = 0,069 \frac{\text{кг сух.пов}}{\text{кг сух.пов}}$. За заданим масовим співвідношенням сухого і відпрацьованого повітря знаходимо масову долю повітря, яке повертається із сушарки в калорифер:

$$K = \frac{1}{1+3} = 0,25..$$

При відомій масовій долі відпрацьованого повітря K, можна за правилом адитивності знайти параметри суміші:

$$x_{\text{сум}} = (1 - k)x_0 + kx_2 = (1-0,25) \cdot 0,01 + 0,25 \cdot 0,069 = 0,0542 \frac{\text{кг сух.пов}}{\text{кг сух.пов}},$$

$$I_{\text{сум}} = (1-k)I_0 + kI_2 = (1-0,25) \cdot 50 + 0,25 \cdot 228 = 184 \frac{\text{кг сух.пов}}{\text{кг сух.пов}}.$$

За цими параметрами суміші знаходимо на діаграмі I-x точку М, яка характеризує стан суміші та з діаграми знаходимо $t_{\text{сум}} = 45^\circ\text{C}$ і $\varphi_{\text{сум}} = 0,85$.

Нагрівання суміші в калорифері відповідає вертикалі $t_{\text{сум}} = \text{const}$ до її перетину з ізотермою $t_1 = 80^\circ\text{C}$ Цій точці перетину відповідає тепловміст

$I_1 = 147 \frac{\text{кг сух.пов}}{\text{кг сух.пов}}$ і відносна вологість $\varphi_1 = 0,018$ повітря після калорифера.

Приклад 3.4. Визначити теплове навантаження калорифера для сушильної установки, яка працює з рециркуляцією частки відпрацьованого повітря. Продуктивність сушарки 5 т/годину (за вологим матеріалом). Матеріал сушиться від 35 до 0,3% (на вологий матеріал). Стан свіжого повітря визначено температурою $t_0 = 25^\circ\text{C}$ і відносною вологістю $\varphi_0 = 70\%$. Стан відпрацьованого повітря: $t_2 = 50^\circ\text{C}$; $t_{\text{MT}} = 40^\circ\text{C}$. Різниця питомих витрат теплоти в дійсній і теоретичній сушарках становить $\Delta = -1000$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг вологи}}$. Температура суміші після калорифера $t_1 = 110^\circ\text{C}$. Визначити також кратність циркуляції.

Рис. 3.6 До прикладу 3.4

Розв'язання. За формулою (2.5) знаходимо кількість видаленої вологи:

$$W = G_1 \frac{\omega_2}{100 - \omega_2} = 3600 \cdot \frac{0,3}{100 - 0,3} = 0,4834 \text{ т}$$

Знаходимо на діаграмі I–x точки А і С за вихідними даними і визначаємо параметри, які характеризують стан свіжого повітря і його стан на виході із сушарки:

1. для точки А маємо: $I_0 = 62,0$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг сух.повітря}}$; $x_0 = 0,014$ $\frac{\text{кг}}{\text{кг сух.повітря}}$;
2. для точки С: $I_2 = 164$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг сух.повітря}}$; $x_2 = 0,045$ $\frac{\text{кг}}{\text{кг сух.повітря}}$.

Щоб знайти точку В₁, скористаємось рівнянням (3.1):

$$I_2 = I_1 - \Delta(x_2 - x_0) = 164 + 1000(0,045 - 0,014) = 195 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Знаходимо на діаграмі I–x лінію I₁ і спускаємось по ній до перетину з ізотермою $t_1 = 110^\circ\text{C}$ ця точка відповідає стану повітря після калорифера В₁. Із точки В₁ проводимо вертикаль до перетину з лінією АС (рис. 3.6). Точка їх перетину М характеризує стан суміші перед калорифером:

$$I_{\text{сум}} = 118 \text{ кг сух. пов.}; x_{\text{сум}} = 0,031.$$

Визначаємо кратність циркуляції за формулою (3.9):

$$\begin{aligned} x_{\text{сум}} - x_0 &= 0,031 - 0,014 \\ x_2 - x_{\text{сум}} &= 0,045 - 0,031 \end{aligned}$$

Знаходимо питому витрату свіжого повітря за формулою (3.12):

$$l_0 = \frac{x_2 - x_0}{x_2 - x_{\text{сум}}} = \frac{0,045 - 0,014}{0,045 - 0,031} = 32,258 \text{ кг вологи}.$$

Питому витрату повітряної суміші знаходимо за формулою (3.13):

$$l_{\text{сум}} = \frac{x_2 - x_0}{x_2 - x_{\text{сум}}} = \frac{0,045 - 0,014}{0,045 - 0,031} = 71,43 \text{ кг вологи}.$$

За формулою (3.15) знаходимо питому витрату теплоти в калорифері:

$$q_k = l_{\text{сум}} (I_1 - I_{\text{сум}}) = 71,43 (195 - 118) = 5500 \text{ кг вологи}.$$

Теплове навантаження калорифера визначаємо за формулою (2.13):

$$Q = q \cdot w = 5500 \cdot 0,4834 = 2658,75 \text{ кВт}.$$

3.5. Сушіння паливними газами

Внаслідок невеликої різниці тепловмістів паливних газів і повітря (не більш як 0,8%) при розрахунках газових сушарок можна користуватися І-х діаграмою вологого повітря, побудованої для високих температур.

Для сушіння паливними газами використовують, головним чином, сушарки, які працюють за схемою нормального варіанта, а також сушарки з частковою рециркуляцією відпрацьованого газу.

Зображення процесів у сушильній установці, яка працює за нормальним сушильним варіантом показано на рис. 3.7.

Рис 3.7 Зображення процесу сушіння паливними газами

За теплом і вологовмістом паливних газів на діаграмі I–x знаходять точку F, яка характеризує стан газів на виході із топки.

Потім знаходять точку A, яка характеризує стан зовнішнього повітря і з'єднують точки A і F прямою лінією.

Далі на прямій AF визначають положення точки M, яка характеризує стан суміші газів і свіжого повітря.

Цю точку знаходять за заданою температурою суміші t_1 або за заданим співвідношенням газів і повітря. Пряма лінія AM на діаграмі I–x відображає процес змішування газів з повітрям. Нахил цієї прямої залежить від вологовмісту і теплотворної властивості палива. Після того як знайдена точка M проводять пряму MC, яка відображає процес видалення вологи із матеріалу, що сушиться.

Питому витрату суміші паливних газів з повітрям визначають за формулою:

$$\ell_{\text{сум}} = x_2 - x_1 \quad (3.16)$$

Питома витрата тепла визначається за такою формулою:

$$\frac{I_K - I_A}{x_2 - x} \quad (3.17)$$

де I_K – тепловміст, який відповідає стану газів у точці K, що лежить на перетині ліній $t_1 = \text{const}$ і $x_0 = \text{const}$.

Приклад 3.5. Визначити питомі витрати тепла та суміші паливних газів з повітрям, якщо паливні гази характеризуються такими параметрами:

– температура $t_F = 4350^\circ\text{C}$, вологовміст: $x_f = 0,1$ кг/кг, а повітря має температуру $t_0 = 20^\circ\text{C}$ і відносну вологість $\phi_0 = 70$. Газова суміш, яка виходить з сушарки має температуру $t_2 = 100^\circ\text{C}$ і вологовміст $x_2 = 0,15$ кг/кг. Температура газової суміші перед сушаркою $t_M = 250^\circ\text{C}$.

Розв'язання: Зображаємо процеси змішування паливних газів і сушіння на діаграмі I–x вологого повітря і з її допомогою знаходимо: $I_A = 50 \text{ кДж}$,

$$I_K = 290 \text{ кДж}, \quad x_0 = 0,04, \quad x_1 = 0,075 \text{ кг}$$

За формулою (3.16) знаходимо:

$$\ell_{\text{сум}} = x_2 - x_1 = 0,15 - 0,075 = 13,3 \text{ кг вологи}$$

а за формулою (3.17):

$$\frac{290 - 50}{0,15 - 0,075} \text{ кДж/кг}$$

3.6. Процес сушіння з конденсацією вологи із відпрацьованого газу

У деяких сполучених технологічних процесах, наприклад сушіння з помелом у замкненому циклі циркуляції газу, який виключає забруднення

атмосфери пилом і зменшує втрати готової продукції, із відпрацьованого газу видаляють вологу шляхом її конденсації. Схема такої установки зображена на рис. 3.8,а, а зображення процесів, що відбуваються в ній на рис 3.8,б.

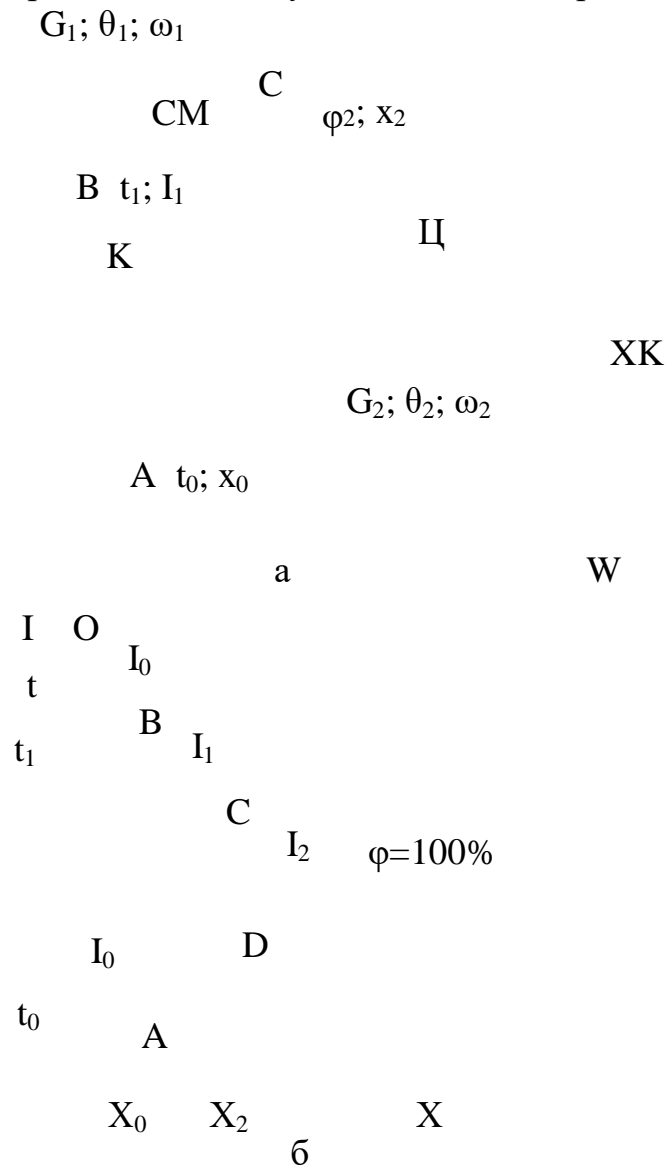


Рис 3.8 Схема установки для здійснення сполученого процесу сушіння – помел у замкненому циклі: а – схема установки; б - зображення процесів на I–x діаграмі

Вологий матеріал, що підлягає сушінню та помелу поступає в сушарку-млин, куди подається нагріте в калорифері К повітря. Висушений і подрібнений матеріал виноситься повітрям із сушарки-млина і поступає в циклон Ц де повітряно-пилева суміш розділяється. Подрібнений матеріал виводиться із циклону за допомогою шлюзового затвору, а вологе повітря подається в холодильник Х, де з нього видаляється волога шляхом конденсації.

Після холодильника повітря знову поступає в калорифер, де підігрівається до заданих параметрів і знову поступає в сушарку-млин і далі цикл повторюється. На діаграмі I–x (рис 3.2,б) процес нагрівання повітря зображається прямою вертикальною лінією АВ, процес сушіння – прямою лінією ВС, охолодження вологого повітря до насиченого стану – прямою СД, а процес конденсації надлишкової вологи зображається лінією ДА. Отже процеси

нагрівання або охолодження повітря на діаграмі I–x зображаються прямими вертикальними лініями, процес сушіння – похилою прямою лінією, а процес конденсації із повітря надлишкової вологи кривою лінією $\varphi = 100\%$.

Приклад 3.6. Визначити масу вологи, яку необхідно сконденсувати із вологого повітря, що виходить із сушарки-млина, де розмелюється і висушується вугілля від початкової вологості 40% до кінцевої 15%.

Продуктивність установки за вологим матеріалом $G = 1500 \frac{т}{година}$.

Стан повітря перед калорифером $\varphi_0=100\%$; $t_0=18^\circ\text{C}$; після калорифера $t_1=110^\circ\text{C}$; після сушарки млина $t_2=45^\circ\text{C}$, різниця внутрішнього теплового балансу сушарки – $90 \frac{кДж}{т}$. Визначити також витрату води, що подається в холодильник, якщо вона має початкову температуру $t_{п}=10^\circ\text{C}$, а кінцеву $t_{к}=14^\circ\text{C}$.

Розв'язання. Визначимо кількість вологи, що видаляється із матеріалу в процесі його сушіння за формулою (2.5):

$$W = G \frac{\omega_k}{100 - \omega_k} = \frac{1500 \cdot 15}{3600 \cdot 100 - 15} = 0,1225 \frac{т}{година}$$

Така ж кількість вологи повинна бути сконденсована в холодильник із вологого повітря, що виходить із сушарки.

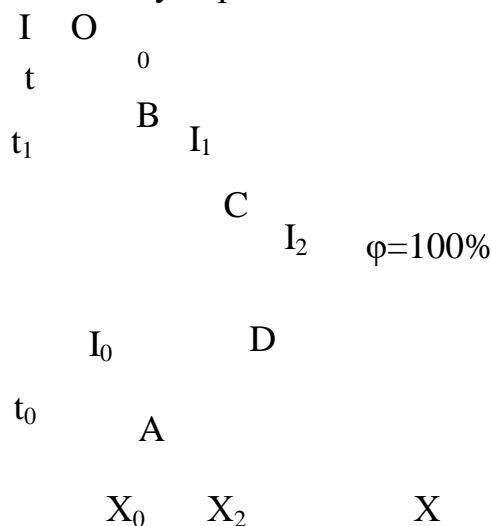


Рис. 3.9 До розв'язання прикладу 3.6

Зображаємо процеси, які відбуваються в установці на діаграмі I–x: точку А – вхід повітря в калорифер знаходимо на перетині ліній $\varphi_0=100\%$, $t_0=18^\circ\text{C}$ (рис. 3.9) і за допомогою I–x діаграми знаходимо: $I_0 = 55 \frac{кДж}{кг \text{ сух. пов.}}$,

$x_0 = 0,012 \frac{кг \text{ сух. пов.}}{кг \text{ сух. пов.}}$; точку В – вихід повітря із калорифера знайдемо на

перетині ліній $x_0 = 0,012 \frac{кг \text{ сух. пов.}}{кг \text{ сух. пов.}}$ та ізотерми $t_1=110^\circ\text{C}$. Із діаграми знаходимо

$I_1=148$ кг сух.пов. . Лінія АВ відображає процес нагрівання повітря в калорифері. За рівнянням (3.1) знаходимо точку О, яка лежить на перетині $I(0)$ і $i=0$.

$$I(0) = I_1 + (x - x_0) = 148 - 90(0 - 0,012) = 149,08 \text{ кг сух.пов.}$$

З'єднуємо цю точку з точкою В прямою лінією і продовжуємо її до перетину з ізотермою $t_2 = 45^\circ\text{C}$. Точка перетину цих ліній і є точка С – кінець процесу сушіння (вихід повітря із сушарки). За допомогою I-x діаграми визначаємо: $I_2 = 146$ кДж ; $x_2 = 0,039$ кг сух.пов. .

Через точку С проводимо вертикальну пряму (процес охолодження повітря) до перетину її з лінією $\phi=100\%$. Точка перетину Д – початок конденсації вологи із повітря. Для цієї точки знаходимо $I_\partial = 138$ кДж ,

$$t_{\text{тр}} = 36^\circ\text{C}, \quad x_\partial = x_2 = 0,039 \text{ кг сух.пов.}$$

Далі по лінії $\phi = 100\%$ з'єднуємо точки Д і А – це відображення процесу конденсації вологи із повітря.

Питома витрата повітря визначається за формулою (2.8):

$$l = \frac{x_2 - x_0}{x_2 - x_0} = \frac{0,039 - 0,012}{0,039 - 0,012} = 37,037 \text{ кг сух.пов.}$$

теплове навантаження холодильника:

$$Q_x = W(I_2 - I_0) l = 0,1225(146 - 55) 37,037 = 412,87 \text{ кВт}.$$

Витрати води в холодильнику визначимо із рівняння теплового балансу $G_v c_v (t_k - t_n) = Q_x$, звідси:

$$G_v = \frac{Q_x}{c_v (t_k - t_n)} = \frac{412,87}{4,19(14 - 10)} = 24,63 \text{ кг/с}.$$

4. ЧИСЛОВІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОГОГО ГАЗУ

Суттєвим недоліком діаграми Л.К. Рамзіна є неможливість визначення параметрів повітря, зволоженого іншою парою будь-якої рідини крім води, а також коли вологе повітря знаходиться під тиском, який відрізняється від тиску, при якому побудована діаграма. Неможливо використання діаграми і в тому випадку, коли замість повітря використовується інший газ, властивості якого дуже відрізняються від властивостей повітря.

З метою визначення параметрів будь-якого газу, зволоженого парою будь-якої рідини використовують числові методи розрахунку. Числові методи

Початок

$m =$

$F/F' > 0,1$

$l = 1/($

Друк

Кінець

Блок-схема розрахунку параметрів
вологого газу реального процесу
сушіння

ефективні в поєднанні з такими засобами розрахунку, як ПЕОМ. На кафедрі ПАХТ УДХТУ розроблена програма розрахунку параметрів вологого газу на ПЕОМ "RAMZIN". За допомогою цієї програми за вихідними властивостями абсолютно сухого газу і вологи, а також при заданому тиску і двох будь-яких параметрах газу визначають з великою точністю всі інші параметри газу, які необхідні при теплових і матеріальних розрахунках процесу сушіння.

Необхідні для розрахунку величини, що характеризують властивості пари і газу ($c_{п,г}$ – питомі теплоємності пари і газу; T – прихована теплота пароутворення, $M_{г, в}$ – молярні маси газу і вологи, A, B, C – постійні в рівнянні Антуана) приймають з відповідних таблиць у довідковій літературі, параметри процесу сушіння: $t_{п}, \varphi_A, t_{в}, \Delta_C$ і φ_C мають бути заданими.

5. КІНЕТИКА СУШІННЯ

5.1. Інтенсивність випаровування вологи із матеріалу

Для першого періоду сушіння інтенсивність випаровування води із матеріалу $\left[\frac{кг}{м \cdot с} \right]$ визначається із рівняння:

$$W = 68,5 \cdot 10^{-4} \cdot \omega^{0,8} (p_H - p_n), \quad (5.1)$$

де ω – швидкість повітря над матеріалом, м/с;

p_H – тиск насиченої пари вологи при температурі мокрого термометра, Па;

p_n – парціальний тиск водяної пари в повітрі, Па.

Приклад 5.1. Визначити інтенсивність випаровування води для першого періоду процесу сушіння матеріалу, якщо швидкість повітря над матеріалом $\omega=1$ м/с, парціальний тиск вологи в повітрі $p_n=2$ кПа, а температура мокрого термометра $t_{мт}=30^\circ\text{C}$.

Розв'язання. За допомогою І-х діаграми стану вологого повітря при температурі мокрого термометра знаходимо тиск насиченої пари вологи $p_H=4,2$ кПа

Відповідно до формули (5.1) інтенсивність випаровування води:

$$W = 8,5 \cdot 10^{-8} \cdot \omega^{0,8} (p_H - p_n) = 8,5 \cdot 10^{-8} \cdot 1^{0,8} (4200 - 2000) = 1,865 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

5.2. Рушійна сила процесу сушіння

У першому періоді процесу сушіння рушійна сила може бути визначена:

а) як різниця температур сушильного агента t і температурою мокрого термометра $t_{мт}$. Цю різницю називають потенціалом процесу сушіння і визначають за формулою:

$$K = t - t_{мт}, \quad (5.2)$$

при цьому вважають, що зовнішня поверхня вологого матеріалу має температуру мокрого термометра $t_{мт}$;

б) як різницю вологовмістів сушильного агента, насиченого парою вологи біля поверхні вологого матеріалу $x_{нас}$ при $t_{мт}$ і в загальній його масі x :

$$\Delta x = x_{нас} - x; \quad (5.3)$$

в) як різницю тисків насиченої пари вологи та її парціальним тиском:

$$\Delta p = p_n - p_n \cdot \quad (5.4)$$

При змінних параметрах сушильного агента впродовж його руху рушійні сили визначаються як середньологарифмічні значення:

– для потенціалу сушіння:

$$\kappa_{cp} = \frac{\kappa_n - \kappa_\kappa}{\ln \frac{\kappa_n}{\kappa_\kappa}}, \quad (5.5)$$

де $\kappa_n = t_n - t_{mt}$, $\kappa_\kappa = t_\kappa - t_{mt}$ – різниці температур при вході і виході із сушильної камери відповідно;

t_n і t_κ – температура сушильного агента при вході і виході із сушарки відповідно;

$t_{mтп}$ і $t_{mтк}$ – температури мокрого термометра при вході і виході сушильного агента, відповідно;

– для різниці вологовмістів:

$$\Delta x_{cp} = \frac{\Delta x_n - \Delta x_\kappa}{\ln \frac{\Delta x_n}{\Delta x_\kappa}}, \quad (5.6)$$

де Δx_n і Δx_κ – різниці вологовмістів сушильного агента при вході і виході його із сушильної камери (визначаються за формулою (5.3));

– для різниці тисків:

$$\Delta p_{cp} = \frac{\Delta p_n - \Delta p_\kappa}{\ln \frac{\Delta p_n}{\Delta p_\kappa}}, \quad (5.7)$$

де Δp_n і Δp_κ – різниці тисків при вході та виході із сушарки, відповідно (визначаються за формулою (5.4)).

Приклад 5.2. Визначити рушійну силу процесу сушіння вологого матеріалу повітрям, яке має температуру $t=50^\circ\text{C}$ і вологовміст $x = 0,037$ кг сух.повітря, його температура мокрого термометра $t_{MT} = 37^\circ\text{C}$, а

вологовміст при цій температурі становить $x_{НАС} = 0,043$ кг сух.повітря.

Розв'язання. За формулою (5.2) знаходимо потенціал сушіння:

$$\kappa = 50 - 37 = 13^\circ\text{C}.$$

Відповідно до формули (5.3.) різниця вологовмістів:

$$\Delta x = x_{НАС} - x = 0,043 - 0,037 = 0,006 \text{ кг сух.повітря}.$$

За допомогою діаграми I–x знаходимо $p_{\Pi} = 5,4$ кПа і $p_{\text{нас}} = 6,4$ кПа, тоді відповідно до (5.4) різниця тисків:

$$p_{\text{нас}} - p_{\Pi} = 6,4 - 5,4 = 1 \text{ кПа.}$$

Приклад 5.3. Визначити середньологарифмічні значення потенціалу сушіння і різниці вологовмістів для теоретичної сушарки, яка працює при наступних параметрах:

– повітря при вході в сушарку має:

$$x_{\Pi} = 0,0125 \text{ кг сух. повітря}, \quad t_{\Pi} = 111^{\circ}\text{C};$$

– стан повітря при виході із сушарки характеризується такими параметрами:

$$x_{\text{K}} = 0,037 \text{ кг сух. повітря}, \quad t_{\text{K}} = 50^{\circ}\text{C}.$$

Розв'язання. Користуючись діаграмою I–x стану повітря, знаходимо температуру його мокрого термометра $t_{\text{MT}} = 37^{\circ}\text{C}$ і вологовміст насиченого

$$x_{\text{нас}} \text{ кг вологи} \\ \text{кг сух. повітря}$$

Для теоретичної сушарки температури мокрого термометра однакові при вході повітря в сушарку і при виході його з неї. Тоді різниця потенціалів сушіння на початку процесу K_{Π} і в кінці його становлять:

$$K_{\Pi} = t_{\Pi} - t_{\text{MT}} = 111 - 37 = 74^{\circ}\text{C},$$

$$K_{\text{K}} = t_{\text{K}} - t_{\text{MT}} = 50 - 37 = 13^{\circ}\text{C},$$

а середньологарифмічне значення потенціалу сушіння:

$$K_{\text{CP}} = \frac{K_{\Pi} - K_{\text{K}}}{\ln \frac{K_{\Pi}}{K_{\text{K}}}} = \frac{74 - 13}{\ln \frac{74}{13}} = 35^{\circ}\text{C}$$

Різниця вологовмістів при вході повітря в сушарку і при виході його з неї:

$$\Delta x_{\Pi} = x_{\text{нас}} - x_{\Pi} = 0,043 - 0,0125 = 0,0305 \text{ кг сух. повітря},$$

$$\Delta x_{\text{K}} = x_{\text{нас}} - x_{\text{K}} = 0,043 - 0,037 = 0,006 \text{ кг сух. повітря}.$$

Середня рушійна сила процесу:

$\Delta x_{\Pi} - \Delta x_{\text{K}}$	$0,0305 - 0,006$	<i>кг вологи</i>
Δx_{Π}	$0,0305$	<i>кг сух. повітря</i>
Δx_{K}	$0,006$	

5.3. Швидкість процесу сушіння

Швидкість процесу сушіння $\left[\begin{matrix} \text{кг} \\ \text{кг} \text{ с} \end{matrix} \right]$ для першого періоду може бути розрахована за таким рівнянням:

$$N = \frac{W}{G_{\text{сух}}} = \beta \cdot F \cdot \Delta x_{\text{CP}} = \beta \cdot f \cdot \Delta x_{\text{CP}}, \quad (5.8)$$

де W – продуктивність сушарки за видаленою вологою, кг/с;

$G_{\text{сух}}$ – маса абсолютно сухого матеріалу, кг;

β – коефіцієнт вологовіддачі від вологої поверхні матеріалу до потоку сушильного агента, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{ с}}$;

$f = \frac{F}{G_{\text{сух}}}$ – питома поверхня випаровування, $\text{м}^2/\text{кг}$. сух. матер.;

F – поверхня випаровування, м^2 .

Коефіцієнт вологовіддачі β визначається із критеріального рівняння:

$$\text{Nu}' = A \cdot \text{Re}^n (\text{Pr}')^{0,33} \cdot \text{Gu}^{0,135}, \quad (5.9)$$

де $\text{Nu}' = \frac{\beta l}{\nu}$ – дифузійний критерій подібності Нусельта;

$\text{Re} = \frac{w l}{\nu}$ – критерій подібності Рейнольдса;

$\text{Pr}' = \frac{w}{\alpha}$ – дифузійний критерій подібності Прандтля;

$\text{Gu} = \frac{w (T - T_{\text{MT}})}{\nu}$ – критерій подібності Гукна;

A і n – сталі, які залежать від режиму руху сушильного агента, наведені в таблиці.

Таблиця сталих у рівнянні (5.9)

Re	A	n
1–200	0,90	0,5
200–6000	0,87	0,54
6000–70000	0,347	0,65

l – визначальний розмір – довжина поверхні випаровування в напрямку руху сушильного агента, м;

D – коефіцієнт дифузії пари вологи в середовищі сушильного агента, $\text{м}^2/\text{с}$;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості сушильного агента, $\text{м}^2/\text{с}$;

w – швидкість сушильного агента, м/с;

T і T_{MT} – температура сушильного агента і його мокрого термометра, К.

Приклад 5.4. Визначити коефіцієнт вологовіддачі в повітря при сушінні матеріалу в сушильній камері, довжина якої 0,2 м. Повітря в сушильну камеру надходить при температурі 140°C і має температуру мокрого термометра $t_{\text{MT}}=39^\circ\text{C}$ швидкість руху повітря відносно матеріалу $w=1$ м/с. Тиск в сушильній камері – атмосферний.

Розв'язання. Відповідно критеріальному рівнянню (5.8) визначаються критерії подібності Re , Pr і Gu :

Критерій Рейнольдса

$$Re = \omega \cdot l \cdot \rho = 1 \cdot 0,2 \cdot 0,845 = 6900,$$

$$\text{де } \rho = \frac{p}{RT} = \frac{831 \cdot 141}{4 \cdot 3} = 0,845 \text{ кг} - \text{ густина газу;}$$

$$p = 10^5 \text{ Па} - \text{ тиск повітря;}$$

$$T = 273 + 140 = 413 \text{ К} - \text{ температура повітря;}$$

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T + C}{273} \right)^3 = 17,3 \cdot 10^{-6} \frac{413 + 124}{273}^3 = 2,45 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$$

μ – в'язкість повітря при робочій температурі;

$\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – в'язкість повітря при нормальних умовах (додаток, таблиця 5);

$C = 124$ – стала Сатерленда для повітря (додаток, таблиця 2),

$\omega = 1 \text{ м/с}$ – швидкість руху повітря;

$l = 0,2 \text{ м}$ – довжина сушильної камери;

$$Pr = \frac{\mu}{\rho D} = \frac{2,45 \cdot 10^{-5}}{0,845 \cdot 39,4 \cdot 10^{-6}} = 0,736;$$

$$D = D_0 \left(\frac{T}{p} \right)^{3/2} = 21,9 \cdot 10^{-6} \frac{10}{5} \left(\frac{413}{10} \right)^{3/2} = 39,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$$

– коефіцієнт дифузії пари води в повітрі при робочих умовах;

$D_0 = 21,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ – коефіцієнт дифузії пари води в повітря при нормальних умовах (додаток, таблиця 4);

$$p_0 = 5 \cdot 10^5 - \text{ нормальний тиск;}$$

$$T_0 = 273 \text{ К} - \text{ нормальна температура;}$$

$$Gu = \frac{T - T_{mm}}{D} = \frac{413 - 314}{D} = 0,245,$$

$T_{mt} = 273 + 39 = 314$ K – температура мокрого термометра.

Із таблиці сталих у рівнянні (5.9) знаходимо значення сталих $A = 0,347$ і $n = 0,65$.

Отже критерій Нусельта:

$$Nu' = 0,347 \cdot 6900^{0,65} \cdot 0,736^{0,33} \cdot 0,245^{0,135} = 81,15.$$

Тоді коефіцієнт вологовіддачі:

$$\beta = Nu' \frac{D}{D} = 81,15 \cdot 39,4 \cdot 10^{-6} = 0,016 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Приклад 5.5. Визначити швидкість процесу сушіння, якщо відомі рушійна сила процесу $\Delta x_{cp} = 0,017$ $\frac{\text{кг сух. пов.}}{\text{кг сух. пов.}}$, коефіцієнт вологовіддачі

$$\beta = 0,016 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \text{ і питома поверхня матеріалу. } f = \frac{F}{\text{сух}} = 0,05 \frac{\text{м}^2}{\text{сух}}$$

Розв'язання. Відповідно до рівняння (5.8) знаходимо:

$$N = \beta \cdot f \cdot x_{cp} = 0,016 \cdot 0,05 \cdot 0,017 = 1,36 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{кг с}}.$$

5.4. Необхідна поверхня сушіння

При сушінні в межах першого періоду необхідна поверхня матеріалу, який сушиться, може бути розрахована за наступним рівнянням:

$$F = \frac{L}{\beta} \left(\frac{x_B}{x_{cp}} - \frac{x_M}{x_{cp}} \right), \text{ м}^2 \quad (5.10)$$

де L – витрата абсолютно сухого сушильного агента, кг/с;

β – коефіцієнт вологовіддачі, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$;

x_B і x_M – більший і менший вологовміст сушильного агента при вході і виході його із зони сушіння, $\frac{\text{кг сух. повітря}}{\text{кг сух. повітря}}$,

$$\Delta x_{cp} = \frac{\Delta x_B - \Delta x_M}{\ln \frac{B}{M}} \text{ – середня рушійна сила процесу сушіння для першого}$$

періоду при змінних параметрах для сушильного агента і матеріалу в умовах сушіння, кг сух. повітря ;

$x = x_{нас} - x$ – рушійна сила процесу при незмінних параметрах для

сушильного агента і матеріалу в умовах сушіння, кг сух. повітря ;

$x_{НАС}$ і x – вологовміст насиченого вологою газу при температурі мокрого термометра на вході і виході із неї і відповідний вологовміст газу в тих же місцях, кг сух. повітря ;

Ц

Δx_B і Δx_M – більша і менша рушійна сила процесу сушіння при вході сушильного агента в першу зону сушіння і при виході із неї, кг сух. повітря .

Необхідну поверхню сушіння для другого періоду при змінних параметрах стану сушильного агента і матеріалу можна визначити за таким рівнянням:

$$\frac{W_{зв'яз}}{\beta \left(x_{НАС.К} + \frac{зв'яз}{x_{НАС.П} - x_{П}} - x_{К} \right)} = \frac{(x_{НАС.П} - x_{П}) \frac{зв'яз}{x_{НАС.К} - x_{К}}}{(x_{НАС.К} - x_{К}) \left(x_{П} + \frac{зв'яз}{x_{НАС.П} - x_{П}} - x_{К} \right)}, \text{ м}^2 \quad (5.11)$$

де $W_{зв'яз} = G_c (\omega_{кр} - \omega_{к})$ – масова витрата зв'язаної в матеріалі води, кг/с;

G_c – масова витрата абсолютно сухого матеріалу, кг/с;

$\omega_{кр}$ і $\omega_{к}$ – перший критичний і кінцевий вологовміст матеріалу

відповідно, кг сух. повітря ;

β – коефіцієнт вологовіддачі, $\frac{\text{кг вологи}}{\text{м}^2 \cdot \text{кг сух. повітря}}$

$x_{НАС.К}$ і $x_{НАС.П}$ – вологовміст насиченого вологою сушильного агента при відповідних температурах мокрого термометра сушильного агента при вході і виході його із другої зони сушіння, кг сух. повітря ;

L – масова витрата абсолютно сухого сушильного агента, кг/с.

Повна необхідна поверхня сушіння:

$$F = F_1 + F_2. \quad (5.12)$$

Приклад 5.6. Визначити необхідну поверхню сушіння матеріалу для першого і другого періодів від початкового вологовмісту 50% до кінцевого вологовмісту 5%. Сушарка працює за прямою схемою. Матеріал має

критичний вологовміст 20% і рівноважний 2,5%. Витрата абсолютно сухого матеріалу 0,5 кг/с. Стан повітря при вході в сушильну камеру: $t_{п}=140^{\circ}\text{C}$ і $x_{п} = 0,0075$ *кг сух. повітря*, а при виході з неї: $t_{к}=63^{\circ}\text{C}$ і $x_{к} = 0,0225$ *кг сух. повітря*, $\omega_{к} = 0,05$ *кг вологи* / *кг сух. повітря*.

Коефіцієнт вологовіддачі $\beta = 0,04$ *кг вологи* / *кг сух. повітря*.

Розв'язання. Так як кінцевий вологовміст матеріалу

$\omega_{к}^c = \frac{20}{100} = 0,05$ *кг вологи* / *кг сух. повітря* менший першого критичного вологовмісту $\omega_{кр} = \frac{20}{100} = 0,05$ *кг вологи* / *кг сух. повітря* то сушіння даного матеріалу відбувається і в першому і в другому періодах сушіння.

Для прямоточного сушіння зміна стану повітря відповідно до зміни стану вологого матеріалу показана на рис. 5.1, де вологовміст повітря на виході із першої зони сушіння x можна визначити із пропорції:

$$\frac{x - x_{п}}{\omega_{п} - \omega_{кр}} = \frac{x_{к} - x_{п}}{\omega_{п} - \omega_{к}}$$

Рис. 5.1. Схема зміни вологовмісту повітря і матеріалу у прямоточній сушарці

Звідки

$$x = \frac{(x_{к} - x_{п})(\omega_{п} - \omega_{кр})}{\omega_{п} - \omega_{к}} + x_{п} = \frac{(0,0225 - 0,0075)(0,5 - 0,2)}{0,05 - 0,0225} + 0,0075 = 0,0225,$$

кг вологи / *кг сух. повітря*,

де $x_{п} = 0,0075$ *кг вологи* / *кг сух. повітря* вологовміст повітря при вході його в першу зону сушарки;

$$x_K = 0,03 \quad \begin{matrix} y & \text{по} & p \\ \text{кг с х.} & \text{віт} & \text{я} \end{matrix} \quad \text{— вологовміст матеріалу при виході його із}$$

сушарки;

$$\begin{matrix} C & 50 & \text{кг вологи} \\ П & 100 & \text{кг сух. повітря} \end{matrix} \quad \text{вологовміст матеріалу при вході його в}$$

сушарку; $\begin{matrix} C & 50 & \text{кг вологи} \\ К & 100 & \text{кг сух. повітря} \end{matrix}$ вологовміст матеріалу при його виході із сушарки.

За допомогою І-х діаграми визначимо вологовміст насиченого повітря для умов входу його в сушарку $x_{\text{нас.П}}=0,048$ і для умов виходу його із сушарки $x_{\text{нас.К}}$ при відповідних температурах

морого термометра повітря. $\begin{matrix} \text{кг вологи} \\ \text{кг сух. повітря} \end{matrix}$

Вологовміст насиченого вологого повітря при виході його із першого періоду можна розрахувати із пропорції:

$$\frac{x_{\text{нас.П}} - x_{\text{нас.К}}}{\omega_{\text{П}} - \omega_{\text{КР}}} = \frac{x_{\text{нас.П}} - x_{\text{нас.К}}}{\omega_{\text{П}} - \omega_{\text{К}}}$$

звідки

$$\frac{x_{\text{нас.П}} - x_{\text{нас.К}}}{\omega_{\text{П}} - \omega_{\text{КР}}} = \frac{x_{\text{нас.П}} - x_{\text{нас.К}}}{\omega_{\text{П}} - \omega_{\text{К}}} \quad \begin{matrix} \text{кг вологи} \\ \text{кг сух. повітря} \end{matrix}$$

Витрата абсолютно сухого повітря в сушарці:

$$\frac{W}{x - x_0} = \frac{0,225}{0,03 - 0,0075} \quad \begin{matrix} \text{кг} \\ \text{с} \end{matrix}$$

де $W = G_c (\omega_{\text{П}} - \omega_{\text{К}}) = 0,5 (0,5 - 0,05) = 0,225 \text{ кг/с}$ — витрата вологи, що видаляється із матеріалу,

$$x_B = x_0 = 0,0225 \quad \begin{matrix} \text{кг сух. повітря} \\ \text{кг сух. повітря} \end{matrix};$$

$$x_M = x_n = 0,0075 \quad \begin{matrix} \text{кг сух. повітря} \\ \text{кг сух. повітря} \end{matrix}.$$

Середня рушійна сила першого періоду сушіння:

$$\begin{matrix} \Delta x_B - \Delta x_M & 0,0405 - 0,0208 & \text{кг вологи} \\ \Delta x_B & 0,0405 & \text{кг сух. повітря} \\ \Delta x_M & 0,0208 & \end{matrix}$$

$$\text{де } \Delta x_B = x_{\text{нас.П}} - x_{\text{П}} = 0,048 - 0,0075 = 0,0405 \quad \begin{matrix} \text{кг сух. повітря} \\ \text{кг сух. повітря} \end{matrix},$$

$$\Delta x_M = x_{НАС} - x = 0,0433 - 0,0225 = 0,0208 \text{ кг сух. повітря}$$

Необхідна поверхня для сушіння матеріалу у першому періоді визначається за формулою (5.10):

$$F = L \cdot \frac{x_B - x}{x_P} = 10 \cdot \frac{0,0225 - 0,0072}{4} = 144,4 \text{ м}^2$$

Необхідна поверхня сушіння в другому періоді визначається за допомогою рівняння (5.11):

$$F_2 = \frac{\beta \cdot \frac{зв'яз}{x_{наск} + \frac{зв'яз}{0,0875} - x_k}}{\ln \left(\frac{x_{насп} - x_k}{x_n + \frac{зв'яз}{0,0875} - x_k} \right)} = \frac{0,0875}{0,04 \left(0,041 + \frac{0,0875}{0,0875} - 0,03 \right)} \ln \left(\frac{(0,0433 - 0,0225)^{0,0875}}{(0,041 - 0,03) \left(0,0225 + \frac{0,0875}{0,0875} - 0,03 \right)} \right) = 286,2 \text{ м}^2$$

де $x_{п} = x = 0,0225$ кг сух. повітря ;

$x_{нас.п} = 0,0433$ кг сух. повітря ;

$\frac{\text{кг вологи}}{\text{кг сух. повітря}}$ $\frac{\text{нас.к}}{\text{кг сух. повітря}}$

$W_{зв'яз} = G_c (W_{кр} - W_p) = 0,5 (0,2 - 0,025) = 0,0875 \text{ кг/с}$ – витрата зв'язаної вологи.

Повна необхідна поверхня для сушіння матеріалу:

$$F = F_1 + F_2 = 144,4 + 286,2 = 430,6 \text{ м}^2$$

5.5. Тривалість процесу сушіння

Тривалість процесу сушіння визначають за такою формулою:

$$\tau = \frac{c}{c} \quad (5.13)$$

де $m_c = f$ – маса абсолютно сухого матеріалу в сушильній камері, кг;

F – загальна поверхня матеріалу в сушарці, м²;

f – питома поверхня матеріалу, $\frac{\text{кг сух. мат.}}{\text{м}^2}$;

G_c – витрата абсолютно сухого матеріалу, що подається на сушіння, кг/с.

Приклад 2.24. Визначити тривалість процесу сушіння матеріалу, який має питому поверхню $f = 0,05$ $\frac{\text{кг сух. мат.}}{\text{м}^2}$. Витрата абсолютно сухого матеріалу $G = 0,5$ кг/с. Необхідна поверхня матеріалу в першому і другому періодах $F = 430,6$ м².

Розв'язання. За формулою загальна тривалість сушіння:

$$\tau = \frac{G}{fG_C} = \frac{0,5}{0,05 \cdot 0,5} = 17224 \text{ с, або } \tau = 4,782 \text{ год.}$$

6. ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

6.1. Вологий матеріал, який містить 280 г води на 1 кг абсолютно сухого матеріалу, висушується до стану, який відповідає вологовмісту 70 г води на 1 кг абсолютно сухого матеріалу. Витрата вологого матеріалу $G_{\text{п}} = 2,0$ т/годину. Визначити продуктивність сушарки за висушеним матеріалом і водою.

Відповідь: $G_{\text{к}} = 0,35$ кг/с; $W = 0,206$ кг/с.

6.2. Визначити парціальний тиск водяної пари в пароповітряній суміші при 80°C і $I = 150$ $\frac{\text{кг сух. повітря}}{\text{кг сух. повітря}}$.

Відповідь: $p_{\text{п}} = 28$ мм рт. ст.

6.3. Визначити кількість води видаленої із 1 кг вологого матеріалу при його сушінні від: а) 120 до 60% і б) 12 до 6% (на абсолютно сухий матеріал).

Відповідь: а) $W = 0,272$; б) $W = 0,0504$ кг.

6.4. Визначити вологовміст і ентальпію вологого повітря при температурі 30°C , відносній вологості $\phi = 75\%$ і загальному тиску $\Pi = 0,0981$ МПа.

Відповідь: $x = 0,0209$ $\frac{\text{кг сух. повітря}}{\text{кг сух. повітря}}$; $I = 83,6$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг сух. повітря}}$.

6.5. Визначити відносну вологість повітря при його температурі $t = 150^{\circ}\text{C}$, загальному тиску $\Pi = 760$ мм рт. ст. і вологовмістові $x = 0,07$ $\frac{\text{кг сух. повітря}}{\text{кг сух. повітря}}$.

Відповідь: $\phi = 10,1\%$.

6.6. Визначити ентальпію і вологовміст пароповітряної суміші, яка має температуру 60°C і відносну вологість 30%. Знайти також температуру точки роси і температуру мокрого термометра.

Відповідь: $t_{TP} = 36,1^{\circ}\text{C}$ $t_{MT} = 39,5^{\circ}\text{C}$ $x = 0,0398$ *кг сух. повітря*,

$I = 65$ *кг сух. повітря*.

6.7. За допомогою I–x діаграми стану повітря визначити парціальний тиск водяної пари, відносну вологість і температуру точки роси пароповітряної суміші, яка має температуру $t = 80^{\circ}\text{C}$ і ентальпію $I = 150$ *кг сух. повітря*.

Відповідь: $P_{п} = 28$ мм рт. ст., $t_{rp} = 29^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 12\%$.

6.8. Визначити витрату сухого повітря та теплоти в теоретичній сушарці при видаленні із матеріалу 100 кг/годину вологи, якщо початковий стан повітря (перед калорифером) має такі параметри: $t_0 = 15^{\circ}\text{C}$, $\varphi_0 = 80\%$; а на виході із сушарки: $t_2 = 44^{\circ}\text{C}$, $\varphi_2 = 50\%$.

Відповідь: $L = 1,32$ кг/с, $Q = 108$ кВт.

6.9. Визначити температуру вологого матеріалу, що виходить із сушарки при вологості більше критичної, якщо повітря при виході із сушарки має температуру $t_2 = 100^{\circ}\text{C}$ і вологовміст $x_2 = 0,0135$ *кг сух. повітря*.

Відповідь: $t_M = 60^{\circ}\text{C}$.

6.10. Перед основним калорифером відбувається змішування свіжого повітря, параметри якого $t_0 = 25^{\circ}\text{C}$, $\varphi_0 = 50\%$, з повітрям, яке виходить із сушарки з параметрами $t_2 = 50^{\circ}\text{C}$, $\varphi_2 = 80\%$, у співвідношенні 1:3 за масою (на сухе повітря). Визначити параметри суміші перед калорифером і після нього, якщо суміш у калорифері підігрівається до температури $t_1 = 80^{\circ}\text{C}$.

Відповідь: $x_{SUM} = 0,0542$ *кг сух. повітря*, $I_{SUM} = 184$ *кг сух. повітря*,
 $t_{SUM} = 45^{\circ}\text{C}$ і $\varphi_{SUM} = 85\%$ (перед калорифером) і
 $x_{SUMI} = x_{SUM} = 0,0542$ *кг сух. повітря*, $I_{SUMI} = 147$ *кг сух. повітря*, $t_{SUMI} = 80^{\circ}\text{C}$ і
 $\varphi_{SUMI} = 0,018$ (після калорифера).

6.11. Визначити рушійну силу процесу сушіння x_{CP} і k_{CP} яке відбувається у першому періоді в теоретичній сушарці за нормальним варіантом. Параметри атмосферного повітря $t_0 = 22^{\circ}\text{C}$, $\varphi_0 = 75\%$, і параметри повітря після сушарки $t_2 = 50^{\circ}\text{C}$, $\varphi_2 = 45\%$.

Відповідь: $x_{CP} = 0,0152$ *кг сух. повітря*, $k_{CP} = 35$ С.

6.12. Визначити продуктивність витяжного вентилятора, розташованого після сушарки, із якій із вологого матеріалу видаляється 100 кг/годину вологи. Вихідні параметри повітря перед калорифером $t_0=15^\circ\text{C}$, $\varphi_0=80\%$ і після сушарки $t_2=45^\circ\text{C}$, $\varphi_2=60\%$ при загальному тиску 750 мм рт. ст.

Відповідь: $V = 3230$ м /годину.

6.13. Визначити необхідні витрати повітря, теплоти гріючої пари і поверхню теплопередачі парового калорифера при сушінні в теоретичній сушарці 500 кг/годину вологого матеріалу від 60 до 10% (на загальну масу матеріалу). Стан повітря перед калорифером визначається його температурою $t_0=20^\circ\text{C}$ і температурою мокрого термометра $t_{\text{MT}}=15^\circ\text{C}$. Температура насиченої гріючої пари на 9°C більша температури повітря, яке виходить із калорифера. Ступінь сухості пари 96%. Коефіцієнт теплопередачі для калорифера $K = 45 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$. Теплові втрати в навколишнє середовище становлять 3% від корисної теплоти.

Відповідь: $L=2,34$ кг/с, $Q=284$ кВт, $F=144$ м².

6.14. Визначити витрати повітря і тепла, а також температуру повітря при вході в калорифер у сушильній установці з рециркуляцією 80% відпрацьованого повітря. Параметри свіжого повітря перед калорифером $\varphi_0=0,7$ і $I_0 = 50$ кДж / кг сух. повітря, відпрацьованого повітря $\varphi_0=0,8$ і $I_2 = 260$ кДж / кг сух. повітря. Продуктивність з вологого матеріалу $G_{\text{П}} = 1500$ кг / годину, початкова та кінцева вологість матеріалу 47 і 5% на вологий матеріал, відповідно.

Відповідь: $L=9700$ кг/годину, $Q=910$ кВт.

6.15. Визначити необхідні витрати повітря і тепла на сушіння матеріалу від 50 до 13% (на вологий матеріал). Продуктивність сушарки з абсолютно сухого матеріалу $G_{\text{сух}} = 1$ т / годину. Параметри атмосферного повітря $t_0=20^\circ\text{C}$ і

$\frac{\text{кг вологи}}{\text{кг сух. повітря}}$ Теплові витрати становлять 15% від загальної кількості тепла. Параметри повітря після калорифера: $t_2=34^\circ\text{C}$ і $x_2=0,028$ кг/кг сухого повітря.

Відповідь: $L=13$ кг/с, $Q=910$ кВт.

6.16. Визначити середнє значення потенціалу сушіння в теоретичній сушарці, де волога випаровується при температурі мокрого термометра. Параметри повітря перед калорифером: $t_0=20^\circ\text{C}$, $\varphi_0=70$, а після сушарки: $t_2=50^\circ\text{C}$ і $\varphi_2=40\%$.

Відповідь: $K_c = 35,8$.

6.17. Матеріал з початковою вологістю 33%, критичною – 17% і рівноважною – 2% (на абсолютно суху речовину) висушується до 9% протягом

8 годин. Визначити час необхідний для сушіння матеріалу при тих же зовнішніх умовах і початковій вологості до кінцевої вологості 3%.

Відповідь: $\tau = 16,5$ годин.

6.18. В сушарці зневоднюється 1000 кг/годину вологого матеріалу від 55 до 8% (на загальну масу). Повітря з параметрами $t_0=20^\circ\text{C}$ і $\phi = 70\%$ нагрівається у калорифері до 10°C , а при виході із сушарки має потенціал $K_2=10^\circ\text{C}$ (К). Визначити необхідні витрати повітря і гріючої пари, яка має тиск $p_{ABC} = 2,5 \text{ кгс/см}^2$ і вологість 5%.

Відповідь: $L = 57,8 \text{ кг/с}$ і $D = 950 \text{ кг/годину}$.

6.19. Визначити витрату гріючої пари ($p_{ABC} = 2,0 \text{ кгс/см}^2$ і вологість 5%), а також поверхню нагрівання калорифера, коефіцієнт теплопередачі, в якому $K = 32 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, якщо в теоретичній сушарці, яка працює за нормальним

варіантом, висушується 500 кг/годину (на абсолютно сухий матеріал) матеріалу під 42 до 9% (на абсолютно сухий матеріал). Температура повітря перед калорифером $t_0 = 20^\circ\text{C}$, температура його точки роси $t_{\text{тр}}=8^\circ\text{C}$. Ентальпія повітря після калорифера $I_1=125 \text{ кДж/кг}$, а температура повітря після сушарки $t_2= 45^\circ\text{C}$. Теплові втрати становлять 15% від витрати тепла в теоретичній сушарці.

Відповідь: $D= 320 \text{ кг/годину}$, $F = 132 \text{ м}^2$.

6.20. Визначити витрати повітря і гріючої пари для протитечійної сушарки, яка працює за нормальним сушильним варіантом і забезпечує продуктивність сушарки $G_n= 600 \text{ кг/годину}$. Початкова вологість матеріалу 50%, кінцева – 9% (на загальну масу). При вході в калорифер повітря має наступні параметри: $t_0= 10^\circ\text{C}$ і $\phi_0=80\%$; при виході із сушарки $t_2=50^\circ\text{C}$ і $\phi_2=50\%$.

Вологість гріючої пари 6%, тиск пари вибрати обгрунтовано. Розглянути два варіанти: а) для теоретичної сушарки; б) для дійсної сушарки при початковій та кінцевій температурах матеріалу 16 і 50°C , питомій теплоємності сухого матеріалу $1,6 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$, масі сталюого транспортера 450 кг і теплових втратах у навколишнє середовище 10% від тепла, яке передається повітрю в калорифері.

Відповідь: $L=2,06 \text{ кг/с}$ і $D=590 \text{ кг пари/годину}$ при $p_{ABC} = 8 \text{ кг/см}^2$.

6.21. В теоретичній сушарці з подвійним проміжним нагріванням повітря висушується 1,8 т/годину вологого матеріалу від 39 до 8% (на загальну масу).

Температура і вологовміст атмосферного повітря $t_0=20^\circ\text{C}$ і $x_0=0,01 \text{ кг вологи/кг сухого повітря}$. При виході із сушарки температура повітря $t_2=45^\circ\text{C}$. В кожному із трьох калориферів повітря нагрівається до 70°C , а після кожної сушильної камери повітря має однакову відносну вологість, яка дорівнює 70%. Знайти необхідні витрати повітря і насиченої гріючої пари, тиск якої $p_{ABC} = 3,0 \text{ кг/см}^2$ і вологість 5%.

Відповідь: $L= 4,5 \text{ кг/с}$.

6.22. Визначити продуктивність сушарки по вологому матеріалу і коефіцієнт теплопередачі в калорифері при сушінні пологого матеріалу від 60 до 10% (на загальну масу). Поверхня теплопередачі калорифера 41 м^2 . Витрата гріючої пари 200 кг/годину, абсолютний тиск пари 3 кгс/см^2 , ступінь сухості 0,9. Витрата теплоти в калорифері на 10% більше її витрати в теоретичній сушарці.

Атмосферне повітря має температуру $t_0=25^\circ\text{C}$ і температуру точки роси $t_{\text{рр}}=25^\circ\text{C}$. Процес сушіння відбувається по лінії $I_1 = I_2 = 100 \text{ кДж/кг}$, а парціальний тиск водяної пари в повітрі після сушильної камери $p_{\text{II}} = 25 \text{ мм рт.ст.}$

Відповідь: $G = 156 \text{ кг/годину}$, $K = 34 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

6.23. Продуктивність сушарки за висушеним до 10% матеріалом 500 кг/годину. Початкова вологість його становила 70% (на загальну масу). Покази психрометра атмосферного тиску повітря $t_0=20^\circ\text{C}$ і $t_{\text{MT}}=15^\circ\text{C}$. Параметри повітря після сушарки: $t_2=45^\circ\text{C}$ і $\varphi=50\%$. Теплові втрати становлять 8% від витрати тепла в теоретичній сушарці. Визначити необхідні значення поверхні парового калорифера, який має коефіцієнт теплопередачі $K=35 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ і витрату гріючої пари, абсолютний тиск якої $2,0 \text{ кгс/см}^2$ і вологість 5%.

Відповідь: $D = 1870 \text{ кг пари/годину}$, $F=868 \text{ м}^2$.

6.24. Визначити термічний ККД теоретичної сушарки, яка працює при наступних параметрах повітря: $t_0=20^\circ\text{C}$, $\varphi_0=80\%$; $t_2=40^\circ\text{C}$ і $\varphi_2=60\%$.

Відповідь: $\eta=58,6\%$.

6.25. Визначити температуру матеріалу, який виходить із сушарки, якщо його вологість вище критичної, а повітря на виході із сушарки характеризується такими параметрами: $t_2=0,034 \text{ кг вологи/кг сухого повітря}$ і $t_2 = 52,3^\circ\text{C}$.

Відповідь: $\theta_M = 37^\circ\text{C}$

6.26. Визначити необхідну площу поверхні матеріалу у протитечійній сушильній камері, де в межах періоду постійної швидкості сушиться 2200 кг/годину пологого матеріалу від 50 до 20% (на загальну масу). Швидкість руху повітря над поверхнею матеріалу, довжина якого $l=0,2 \text{ м}$, становить $\omega=6 \text{ м/с}$. Параметри повітря перед калорифером: $t_0=20^\circ\text{C}$, $\varphi_0=50\%$ після сушарки $t_2=63^\circ\text{C}$ і $\varphi_2=27\%$.

Відповідь: $F = 220 \text{ м}^2$.

6.27. Зіставити питомі витрати повітря і теплоти в сушарці для літнього та зимового періоду часу (в умовах Дніпропетровська), якщо в обох випадках повітря, яке виходить із сушарки буде мати: $t_2=40^\circ\text{C}$ і $\varphi_2=60\%$. Сушарка теоретична і працює за нормальним варіантом.

Відповідь: для умов зими $l = 36 \text{ кг/кг}$, $q = 3633 \text{ кДж/кг}$,
для умов літа $l = 50,5 \text{ кг/кг}$, $q = 2879 \text{ кДж/кг}$.

Додаток

Таблиця 1

Властивості насиченої водяної пари в залежності від температури

Темпе- ратура, °C	Тиск (абсолют- ний), кгс/см ²	Питомий об'єм, м ³ /кг	Густина, кг/м ³	Питома ентальпія рідини і', кДж/кг	Питома Ентальпія пари і'', кДж/кг	Питома теплота пароутво- рення r, кДж/кг
0	0,0062	206,5	0,00484	0	2493,1	2493,1
5	0,0089	147,1	0,00680	20,95	2502,7	2481,7
10	0,0125	106,4	0,00940	41,90	2512,3	2470,4
15	0,0174	77,9	0,01283	62,85	2522,3	2470,4
20	0,0238	57,8	0,01729	83,80	2532,0	2448,2
25	0,0323	43,40	0,02304	104,75	2541,7	2436,9
30	0,0433	32,93	0,03036	125,70	2551,3	2425,6
35	0,0573	25,25	0,03960	146,65	2561,0	2414,3
40	0,0752	19,55	0,05114	167,60	2570,6	2403,0
45	0,0977	15,28	0,06543	188,55	2579,8	2391,3
50	0,1258	12,054	0,0830	209,50	2589,5	2380,0
55	0,1605	9,589	0,1043	230,45	2598,7	2368,2
60	0,2031	7,687	0,1301	251,40	2608,3	2356,9
65	0,2550	6,209	0,1611	272,35	2617,5	2345,2
70	0,3177	5,052	0,1979	293,30	2626,3	2333,0
75	0,393	4,139	0,2416	314,3	2636	2321
80	0,483	3,414	0,2929	335,2	2644	2310
85	0,590	2,832	0,3531	356,2	2653	2297
90	0,715	2,365	0,4229	377,1	2662	2285
95	0,862	1,985	0,5039	398,1	2671	2273
100	1,033	1,675	0,5970	419,0	2679	2260
105	1,232	1,421	0,7036	440,4	2687	2248
110	1,461	1,212	0,8254	461,3	2696	2234
115	1,724	1,038	0,9635	482,7	2704	2221
120	2,025	0,893	1,1199	504,1	2711	2207
125	2,367	0,7715	1,296	525,4	2718	2194
130	2,755	0,6693	1,494	546,8	2726	2179
135	3,192	0,5831	1,715	568,2	2733	2165
140	3,685	0,5096	1,962	589,5	2740	2150
145	4,238	0,4469	2,238	611,3	2747	2125
150	4,855	0,3933	2,543	632,7	2753	2120
160	6,303	0,3075	3,252	654,1	2765	2089
170	8,080	0,2431	4,113	719,8	2776	2056
180	10,23	0,1944	5,145	763,8	2785	2021
190	12,80	0,1568	6,378	808,3	2792	1984
200	15,85	0,1276	7,840	852,7	2798	1945
210	19,55	0,1045	9,567	897,9	2801	1904
220	23,66	0,0862	11,600	943,2	2803	1860
230	28,53	0,07155	13,98	989,3	2802	1813
240	34,13	0,05967	16,76	1035	2799	1763
250	40,55	0,04998	20,01	1082	2792	1710

						Продовження табл. 1	
260	47,85	0,04199	23,82	1130	2783	1653	
270	56,11	0,03538	28,27	1178	2770	1593	
280	65,42	0,02988	33,47	1226	2754	1528	
290	75,88	0,02525	39,60	1275	2734	1459	
300	87,6	0,02131	46,93	1327	2710	1384	
310	100,7	0,01799	55,59	1380	2682	1302	
320	115,2	0,01516	65,95	1437	2650	1213	
330	131,3	0,01273	78,53	1498	2613	1117	
340	149,0	0,01064	93,98	1564	2571	1009	
350	168,6	0,00884	113,2	1638	2519	881,1	
360	190,3	0,00716	139,6	1730	2444	713,6	
370	214,5	0,00585	171,0	1890	2304	411,5	
374	225	0,00310	322,6	2100	2100	0	

Таблиця 2

Значення сталих у рівнянні (2.6) для визначення тиску насиченої пари для деяких рідин

Рідина	Значення сталих у рівнянні (2.6)		
	A		C
Ацетон	16,6513	2940,46	-35,93
Анілін	16,6748	3857,52	-73,15
Бензол	15,9008	2788,51	-52,36
Бутилацетат	16,1836	3151,09	-69,15
Вода	18,3036	3816,44	-46,13
Гептан	15,8737	2911,32	-56,51
Ізопропіловий спирт	18,6929	3640,20	-53,54
Метилловий спирт	18,5875	3626,55	-34,29
Оцтова кислота	16,8080	3405,57	-56,34
Толуол	16,0137	3096,52	-53,67
Хлорбензол	16,0676	3295,12	-55,60
Хлороформ	15,9732	2696,79	-46,16
Етилацетат	16,1516	2790,50	-57,15
Етиловий спирт	18,9119	3803,98	-41,68

Таблиця 3

Питома теплота пароутворення рідини кДж/кг
Температура, °C

Рідина	Температура, °C				
	0	20	60	100	140
Аміак	1265,4	1190,0	-	-	-
Ацетон	565,7	553,1	519,6	473,5	-
Бензол	448,3	435,8	408,5	379,2	346,1
Бутиловий спирт	703,9	687,2	653,6	611,7	561,5
Вода	2493,1	2446,9	2359,0	2258,4	2149,5
Діоксид вуглецю	235,1	155,4	-	-	-
Ізопропіловий спирт	775,2	750,0	699,7	636,9	557,3
Метилловий спирт	1198,3	1173,2	1110,4	1013,9	892,6
Пропіловий спирт	812,9	791,9	745,8	683,0	595,0
Сірковуглець	374,6	367,0	344,4	316,4	282,4
Толуол	414,8	407,7	388,8	368,7	344

Хлорбензол	375,8	369,5	354,4	338,1	320,5
Хлороформ	271,5	263,1	247,6	231,3	–
Етиловий спирт	921,8	913,4	879,9	812,9	712,3
Етилацетат	427,4	411,5	385,9	355,7	317,2

Таблиця 4

Коефіцієнти дифузії газів і пари в повітрі (при нормальних умовах)

Газ	$D_0 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$	Газ	$D_0 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$
Азот	13,2	Метанол	13,3
Аміак	17,0	Сірковуглець	8,9
Бензол	7,7	Сірки діоксид	10,3
Водень	61,1	Сірки триоксид	9,4
Водяна пара	21,9	Діоксид вуглецю	13,8
Діетиловий ефір	7,8	Хлорводень	13,0
Кисень	17,8	Етанол	10,2

Таблиця 5

Середня температура і відносна вологість атмосферного повітря в деяких містах України

Газ	Січень		Липень	
	$t, ^\circ\text{C}$, %	$t, ^\circ\text{C}$, %
Дніпропетровськ	–6,0	88	22,3	60
Київ	–6,0	89	19,3	69
Кіровоград	–5,8	88	20,9	60
Миколаїв	–4,0	88	23,1	63
Одеса	–3,1	88	22,6	61
Харків	–7,7	88	20,3	65

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк, М.И. Курочкина. – СПб.: Химия, 1993. – 495 с.

2. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – 10-е изд. переработ. и дополн. – Л.: Химия, 1987. – 560 с.

3. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1966. – 664 с.