

О. Ю. Співак

**СУШИЛЬНІ ПРОЦЕСИ
ТА УСТАНОВКИ
ПРИКЛАДИ ТА ЗАДАЧІ**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. Ю. Співак

**СУШИЛЬНІ ПРОЦЕСИ
ТА УСТАНОВКИ
ПРИКЛАДИ ТА ЗАДАЧІ**

Навчальний посібник

**Вінниця
ВНТУ
2014**

УДК 533.6.011.6(075)

ББК 30.124я73

С39

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 2 від 29.09.2011 р.).

Рецензенти:

С. Й. Ткаченко, доктор технічних наук, професор

Г. С. Ратушняк, кандидат технічних наук, професор

І. П. Паламарчук, доктор технічних наук, професор

Співак, О. Ю.

С39 Сушильні процеси та установки. Приклади та задачі : навчальний посібник / О. Ю. Співак. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 115 с.

В посібнику подано приклади розв'язування задач аналітичними та графічними методами та сформовано задачі для самостійної роботи студентів заочної та очної форми навчання в процесі засвоєння дисципліни. Наведено розрахунки процесу сушіння для різних схем руху теплоносія та основи теплових розрахунків сушарок різних конструкцій. Наведені приклади графічних розрахунків процесу сушіння та всі необхідні довідкові матеріали для теплових розрахунків сушарок.

УДК 533.6.011.6(075)

ББК 30.124я73

ЗМІСТ

Передмова.....	4
1 ХАРАКТЕРИСТИКИ СУШИЛЬНИХ АГЕНТІВ	5
Задачі для самостійної роботи	11
2 ПРОЦЕС В ТЕОРЕТИЧНІЙ СУШАРЦІ.....	13
Задачі для самостійної роботи	18
3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОГОГО МАТЕРІАЛУ.....	22
Задачі для самостійної роботи	26
4 ІНТЕНСИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ВИПАРОВУВАННЯ.....	28
Задачі для самостійної роботи	30
5 ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС СУШИЛЬНИХ УСТАНОВОК	32
Задачі для самостійної роботи	33
6 СХЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУШННЯ	35
Задачі для самостійної роботи	44
7 РОЗРАХУНКИ ДІЙСНИХ СУШАРОК.....	47
Задачі для самостійної роботи	58
8 РОЗРАХУНКИ КОНВЕКТИВНИХ СУШАРОК	60
8.1 Камерні конвективні сушарки	60
8.2 Розрахунки пневматичних сушарок.....	76
8.3 Розрахунки вихрових сушарок	83
8.4 Розрахунки сушарок з киплячим шаром	89
8.5 Розрахунки барабанних сушарок	95
Література	103
Додатки.....	104
Українсько-англійський словник найбільш вживаних термінів	114

ПЕРЕДМОВА

Перебудова навчального процесу у вищій школі віддає пріоритетну роль у професійній підготовці студентів, їх самостійній роботі. Це потребує відповідного методичного забезпечення, яке б орієнтувало студентів як на набуття необхідних фундаментальних знань, так і практичних навиків розв'язування інженерних задач.

У запропонованому методичному навчальному посібнику наведені різноманітні за тематикою і мірою складності задачі, які охоплюють всі основні розділи дисципліни "Сушильні процеси та установки", приклади розв'язування задач, задачі для самостійної роботи, довідкові дані, необхідні для розрахунків процесів з вологим повітрям, яке є основним видом теплоносія для конвективного сушіння та загальні пояснення щодо методів розрахунків конвективних сушарок безперервної дії, які найбільш поширені в промисловості для масової сушки матеріалів. Наведені приклади розрахунків сушарок різного типу.

Основна мета запропонованого навчального посібника – допомогти студентам в процесі самостійної роботи оволодіти методикою розрахунків як окремих термодинамічних процесів з вологим повітрям, так і методикою комплексних розрахунків різних типів сушильної техніки.

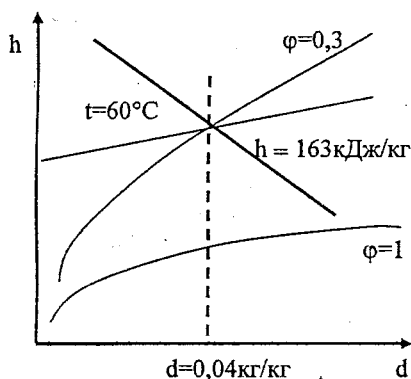
Для успішної підготовки за СРС студентам необхідно розв'язати певний набір задач із кожного розділу. Для цього потрібно вивчити (повторити) теоретичний матеріал за рекомендованою літературою. Після цього ознайомитись з прикладами розв'язування задач, наведеними в даному посібнику і лише тоді розпочинати розв'язування задач. Необхідну допомогу і роз'яснення студент отримує від викладача на консультаціях, а в призначений термін звітує про виконання самостійної роботи.

Посібник буде корисний студентам не лише при вивченні дисципліни "Сушильні процеси та установки", а й під час курсового та дипломного проектування за спеціальністю "Теплоенергетика" та "Енергетичний менеджмент".

1 ХАРАКТЕРИСТИКИ СУШИЛЬНИХ АГЕНТІВ

Приклад 1.1 Знайти ентальпію (enthalpy) і вологовміст (moisture content) вологого повітря для температури $60\text{ }^\circ\text{C}$ і відносної вологості $\varphi = 0,3$.

Розв'язання

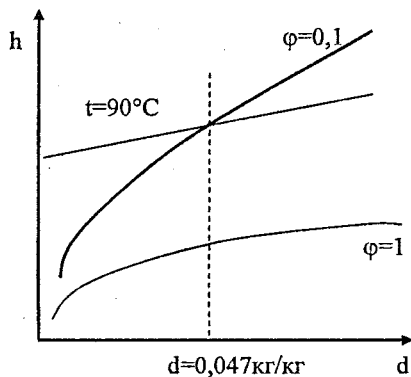


За h-d діаграмою для вологого повітря (додаток А) знаходимо точку перетину ізотерми $60\text{ }^\circ\text{C}$ з лінією $\varphi = 0,3$. Цій точці відповідають: ентальпія $h = 163\text{ кДж/кг}$ сухого (dry) повітря (air), вологовміст $d = 0,04\text{ кг/кг}$ сухого повітря (схема розв'язування показана на рис. 1.1).

Рисунок 1.1 – Визначення тепловологісних характеристик повітря за h-d діаграмою

Приклад 1.2 Знайти відносну вологість повітря для $90\text{ }^\circ\text{C}$ і вологовмісту $0,047\text{ кг/кг}$ сухого повітря.

Розв'язання



За h-d діаграмою (додаток А) знаходимо точку перетину ізотерми $90\text{ }^\circ\text{C}$ з лінією постійного вологовмісту $d = 0,047\text{ кг/кг}$; цій точці відповідає відносна (relative) вологість (humidity) повітря $\varphi = 0,1$.

Графічна схема розв'язання показана на рис. 1.2.

Рисунок 1.2 – Визначення тепловологісних характеристик повітря за h-d діаграмою

Приклад 1.3 Визначити парціальний (partial) тиск (pressure) водяної (water) пари (vapor) у пароповітряній суміші для $80\text{ }^\circ\text{C}$ і ентальпії $h = 250\text{ кДж/кг}$ сухого повітря.

Розв'язання

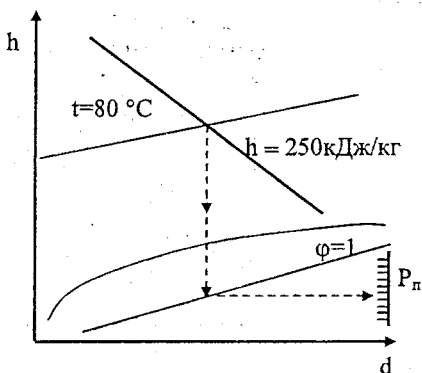


Рисунок 1.3 – Визначення тепловологісних характеристик повітря за h-d діаграмою

За h-d діаграмою знаходимо точку перетину ізотерми $80\text{ }^\circ\text{C}$ з лінією $h=250\text{ кДж/кг}$ сухого повітря і цю точку проектуємо на лінію парціального тиску водяної пари, яка знаходиться внизу діаграми; отриману точку проектуємо зліва направо на вісь ординат, на якій нанесені парціальні тиски водяної пари.

Для $t = 80\text{ }^\circ\text{C}$ і $h = 250\text{ кДж/кг}$: $p_n = 8\text{ кПа}$.

Графічна схема розв'язання показана на рис.1.3.

Приклад 1.4 Повітря з температурою $24\text{ }^\circ\text{C}$ і $\phi = 0,7$ нагрівається в калорифері до $90\text{ }^\circ\text{C}$. Знайти тепло- і вологовміст повітря на виході з калорифера.

Розв'язання

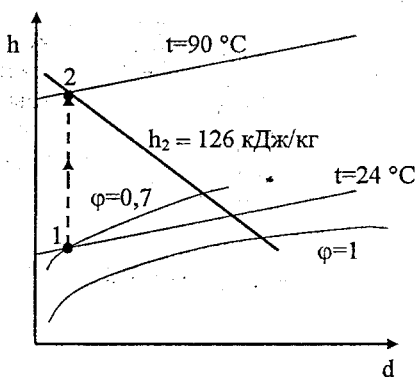


Рисунок 1.4 – Визначення тепловологісних характеристик повітря за h-d діаграмою

Графічне розв'язання задачі показане на рис. 1.4. Початковий стан повітря визначається точкою перетину ізотерми $t = 24\text{ }^\circ\text{C}$ з лінією $\phi = 0,7$. Цій точці відповідають $d = 0,013\text{ кг/кг}$ і $h = 54,5\text{ кДж/кг}$. Зміна стану повітря (air condition) йде за постійним вологовмістом, тобто для $d = \text{const}$. Відповідно кінцевий стан повітря (точка 2) визначиться точкою перетину лінії $d = 0,013\text{ кг/кг}$ з ізотермою $t = 90\text{ }^\circ\text{C}$.

Цій точці відповідає ентальпія $h_2 = 126\text{ кДж/кг}$.

Приклад 1.5 Знайти точку роси (dew point) для вологого повітря за $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$ і $\phi = 0,8$.

Розв'язання

Як відомо, точка роси відповідає тій температурі, за якої пароповітряна суміш з даним вологовмістом виявляється насиченою (saturated) водяною парою. Під час охолодження вологого повітря нижче цієї температури, відбувається конденсація (condensation) водяної пари. Отже, для визначення точки роси, необхідно на h - d діаграмі знайти точку, яка відповідає заданому стану повітря, потім пересунути по лінії $d = \text{const}$ до перетину з кривою (curve) $\phi = 1$, тобто до лінії повного насичення. У нашому випадку $d = 0,039\text{ кг/кг}$ і точка роси відповідає температурі $t = 36\text{ }^\circ\text{C}$.

Приклад 1.6 Знайти аналітично вологовміст і ентальпію повітря для $30\text{ }^\circ\text{C}$ і $\phi = 0,75$; $P = 100\ 000\text{ Па}$.

Розв'язання *

Для нашого випадку $\phi = 0,75$; $P_{\text{нас}} = 4300\text{ Па}$ (з таблиць насиченої водяної пари (додаток В) для $30\text{ }^\circ\text{C}$).

Підставляючи відповідні значення, отримаємо

$$d = 0,622 \frac{\phi \cdot P_{\text{нас}}}{P - \phi \cdot P_{\text{нас}}} = 0,622 \frac{0,75 \cdot 4300}{100000 - 0,75 \cdot 4300} = 0,021\text{ кг/кг}$$

Ентальпія вологого повітря

$$\begin{aligned} h &= C_p \cdot t + (r + C_p \cdot t) \cdot d = (1,01 \cdot 10^3 + 1,97 \cdot 10^3 \cdot d) \cdot t + 2493 \cdot 10^3 \cdot d = \\ &= (1,01 \cdot 10^3 + 1,97 \cdot 10^3 \cdot 0,021) \cdot 30 + 2493 \cdot 10^3 \cdot 0,021 = \\ &= 83\text{ кДж/кг} \end{aligned}$$

Приклад 1.7 За даними попереднього прикладу визначити об'єм вологого повітря, що припадає на 1 кг сухого повітря, тобто на $(1 + d)$ кг суміші.

Розв'язання

Об'єм вологого повітря

$$v = \frac{R_n \cdot T}{P - \phi \cdot P_{\text{нас}}} = \frac{287 \cdot 303}{9,81 \cdot 10^4 - 0,75 \cdot 0,043 \cdot 9,81 \cdot 10^4} = 0,92\text{ м}^3/\text{кг}$$

Приклад 1.8 Знайти густину (density) вологого повітря, що залишає сушарку для $t_2 = 55\text{ }^\circ\text{C}$ і $\phi_2 = 70\%$. Загальний тиск $P = 750\text{ мм рт. ст.}$ Дати виведення розрахункової формули.

Розв'язання

Відомо, що $\rho_{\text{вп}} = \rho_{\text{мв}} + \rho_{\text{п}}$, тобто густина вологого повітря дорівнює су-

мі густин сухого повітря і водяної пари, взятих кожна для свого парціального тиску.

Оскільки

$$d = \frac{G_n}{G_{\text{пв}}} = \frac{\rho_n V}{\rho_{\text{пв}} \cdot V},$$

то

$$\rho_n = d \cdot \rho_{\text{пв}}.$$

Отже

$$\begin{aligned} \rho_{\text{вп}} &= \rho_{\text{пв}} + d \rho_{\text{пв}} (1 + d) = \frac{\rho_0 T_0}{T P_0} (1 + d) = \\ &= \rho_0 \frac{T_0 P_n}{T P_0} (P - \varphi P_{\text{нас}}) \left(1 + 0,622 \frac{\varphi P_{\text{нас}}}{P - \varphi P_{\text{нас}}} \right). \end{aligned}$$

Зробивши перетворення, отримаємо

$$\rho_{\text{вп}} = \rho_0 \frac{T_0 P}{T P_0} \left(1 - \frac{0,378 \varphi P_{\text{нас}}}{P} \right).$$

З останньої формули видно, що густина вологого повітря завжди менша густини сухого повітря.

Підставивши у формулу $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$; $T_0 = 273 \text{ °К}$; $P_0 = 101325 \text{ Па}$, одержимо для $t = 55 \text{ °С}$ (для цієї температури $P_{\text{нас}} = 16050 \text{ Па}$)

$$\rho_{\text{вп}} = 1,293 \frac{273 \cdot 750}{(273 + 55) \cdot 760} \left(1 - \frac{0,378 \cdot 0,7 \cdot 16050}{101325} \right) = 1,02 \text{ кг/м}^3.$$

Приклад 1.9 Знайти парціальний тиск водяної пари в повітрі, густину і вологовміст повітря, якщо його температура 60 °С , залишковий тиск 50666 Па і $\varphi = 0,4$.

Розв'язання

З додатка В знаходимо $P_{\text{нас}} = 19920 \text{ Па}$.

Тоді, парціальний тиск пари в повітрі

$$P_n = 19920 \cdot 0,4 = 7968 \text{ Па}.$$

Вологовміст

$$d = 0,622 \frac{\varphi \cdot P_{\text{нас}}}{P - \varphi \cdot P_{\text{нас}}} = 0,622 \frac{7968}{50666 - 7968} = 0,116 \text{ кг/кг}.$$

Густина вологого повітря

$$\rho_{\text{вп}} = \rho_0 \frac{T_0 P}{T P_0} \left(1 - \frac{0,378 \varphi P_{\text{нас}}}{P} \right) =$$

$$= 1,293 \frac{273 \cdot 50666}{333 \cdot 101325} \left(1 - \frac{0,378 \cdot 0,4 \cdot 7968}{50666} \right) = 0,5 \text{ кг/м}^3.$$

Приклад 1.10 Визначити φ – відносну вологість повітря для $t = 150^\circ \text{C}$ і $P = 101325 \text{ Па}$, якщо його вологовміст $d = 0,07 \text{ кг/кг}$.

Розв'язання

За температури повітря вище температури кипіння води для атмосферного тиску, тиск водяної пари постійний і дорівнює атмосферному, тобто $P_{\text{нас}} = P$. Тоді

$$d = 0,622 \frac{\varphi \cdot P_{\text{нас}}}{P - \varphi \cdot P_{\text{нас}}} = 0,622 \frac{\varphi}{1 - \varphi},$$

тобто, за даного вологовмісту φ є певною величиною і не залежить від температури:

$$0,7 = 0,622 \frac{\varphi}{1 - \varphi},$$

звідки $\varphi = 0,1$ або $\varphi = 10\%$.

Приклад 1.11 Знайти вологовміст вологого повітря для $t = 60^\circ \text{C}$ і $\varphi = 50\%$, якщо барометричний тиск $P = 102 \text{ кПа}$, і визначити помилку у відсотках для розрахунку цього вологовмісту за допомогою h - d діаграми.

Розв'язання

З додатка В для $t = 60^\circ \text{C}$:

$$P_{\text{нас}} = 19920 \text{ Па.}$$

Тоді:

$$d = 0,622 \frac{\varphi P_{\text{нас}}}{P - \varphi P_{\text{нас}}} = 0,622 \frac{0,5 \cdot 19920}{102000 - 0,5 \cdot 19920} = 0,0672 \text{ кг/кг.}$$

З h - d діаграми за $P = 102000 \text{ Па}$, для $t = 60^\circ \text{C}$ і $\varphi = 50\%$ знаходимо

$$d \approx 0,0695 \text{ кг/кг.}$$

Похибка становить

$$\Delta = \frac{0,0695 - 0,0672}{0,0695} 100 \approx 3\%.$$

Приклад 1.12

Знайти температуру матеріалу, що виходить з сушарки, якщо його вологість вище критичної і повітря на виході з сушарки має $t_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ і $d_2 = 0,0135\text{ кг/кг}$.

Розв'язання

У даному випадку температура вологого матеріалу приблизно дорівнює температурі насиченої плівки (pellicle) повітря. Знайшовши на h-d діаграмі точку, відповідну заданому стану повітря, рухаємось вниз по лінії $t_m = \text{const}$ до перетину з лінією повного насичення, тобто $\phi = 1$. Точці перетину цих ліній відповідає температура $\vartheta = t_m = 60\text{ }^\circ\text{C}$.

З огляду на те що значення $d_{\text{нас}}$, а також ϑ при температурі повітря нижче $140\text{ }^\circ\text{C}$, мало відрізняються від відповідних величин, що визначаються не по лінії $\vartheta = \text{const}$, а по лінії $h = \text{const}$, з певною похибкою можна знаходити значення $t_m = \vartheta$ також по лінії $h = \text{const}$.

Приклад 1.13 Визначити за показами психрометра (hygrometer) відносну вологість повітря, що залишає сушарку з тиском 98 кПа , якщо температура сухого термометра $t = 85\text{ }^\circ\text{C}$, температура мокрого термометра $t_m = 68\text{ }^\circ\text{C}$, барометричний тиск (barometric pressure) $P = 100\text{ 000 Па}$, а швидкість повітря $\omega = 1\text{ м/сек}$.

Розв'язання

Слід розв'язати рівняння:

$$\phi = \frac{P_{\pi}}{P_{\text{нас}}}$$

За таблицями для водяної пари (додаток В) знаходимо, що за $t = 85\text{ }^\circ\text{C}$ абсолютний тиск насиченої пари $P_{\text{нас}} = 59\text{ 000 Па}$. Потім визначимо парціальний тиск пари (partial pressure of vapor) за допомогою психрометричної формули:

$$P_{\pi} = P'_{\text{нас}} - A(t - t_m)P$$

Знаходимо з таблиць для водяної пари (додаток В) абсолютний тиск насиченої пари для температури t_m мокрого термометра:

$$P'_{\text{нас}} = 29\text{ 120 Па}$$

Коефіцієнт A для заданої швидкості повітря 1 м/сек визначається за формулою:

$$A = 0,00001 \left(65 + \frac{6.75}{1} \right) = 0,00072.$$

$$\text{Отже: } \phi = \frac{29120 - 0,00072 \cdot (85 - 68) \cdot 100000}{59000} = 0,47.$$

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Задача 1.1 У скільки разів більше потрібно видалити вологи із 1 кг вологого матеріалу при висушуванні його від 50 до 25%, ніж 2 до 1% вологості (рахуючи на загальну масу). В обох випадках поступає на сушку 1 кг вологого матеріалу.

Задача 1.2 Знайти вологовміст і ентальпію повітря після сушіння для $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi = 0,7$.

Задача 1.3 Знайти вологовміст і відносну вологість пароповітряної суміші для $50\text{ }^\circ\text{C}$, якщо дано, що парціальний тиск водяної пари в суміші 10000 Па.

Задача 1.4 Знайти вміст водяної пари в суміші: а) з повітрям, б) з водою, в) з етаном (рахуючи на 1 кг сухого газу) для $t = 35\text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi = 0,45$. Загальний тиск $P_{\text{абс}} = 103\text{ кПа}$.

Задача 1.5 Порівняти питому витрату теплоти та повітря в сушарці для літнього та зимового часу (в умовах Вінниці), якщо в обох випадках повітря, яке виходить із сушарки, буде мати $t_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ та $\varphi_2 = 0,6$. Сушарка теоретична, працює за нормальним сушильним варіантом. Характеристики стану повітря в різний час року: $t = -15,1\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 89\%$ для зимового періоду і $t = 19,3\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 69\%$ для літнього періоду.

Задача 1.6 Абсолютний тиск пароповітряної суміші за $150\text{ }^\circ\text{C}$ і відносної вологості $\varphi = 0,5$ складає 745 мм рт. ст. Знайти парціальні тиски водяної пари і повітря та вологовміст повітря.

Задача 1.7 Вологе повітря з температурою $130\text{ }^\circ\text{C}$ та $\varphi = 0,3$ знаходиться під тиском $P_{\text{абс}} = 700\text{ кПа}$. Знайти парціальний тиск повітря його густину і вологовміст.

Задача 1.8 Яку кількість вологи винесе з собою повітря, яке надходить в сушарку в кількості 200 кг/год (рахуючи на абсолютно сухе повітря) з температурою $t_1 = 95\text{ }^\circ\text{C}$ ($P = 100\text{ кПа}$) та $\varphi_1 = 5\%$ і виходить після сушіння з $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$ та $\varphi_2 = 60\%$.

Задача 1.9 Насичене вологе повітря з температурою $130\text{ }^\circ\text{C}$ знаходиться під абсолютним тиском $P = 700\text{ кПа}$. Знайти парціальний тиск водяної пари, густину, вологого повітря та вологовміст повітря.

Задача 1.10 Знайти роботу витяжного вентилятора для сушарки, в якій із висушуваного матеріалу видалається 100 кг/год вологи за таких умов: $t_0 = 15\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 0,8$, $t_2 = 45\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 0,6$, $P = 750\text{ мм рт. ст.}$

Задача 1.11 Повітря перед потраплянням в сушарку підігрівається в калорифері до $113\text{ }^\circ\text{C}$. На виході із сушарки температура повітря $60\text{ }^\circ\text{C}$ та $\varphi_2 = 0,3$. Знайти точку роси зовнішнього повітря. Процес сушіння вважати теоретичним.

Задача 1.12 Температура повітря за сухим термометром $50\text{ }^\circ\text{C}$, за мокрим $30\text{ }^\circ\text{C}$. Знайти всі характеристики повітря.

Задача 1.13 Знайти точку роси і відносну вологість повітря, яке вихо-

дять із сушарки за показниками психрометра: $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 35\text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 1.14 Знайти температуру матеріалу в теоретичній сушарці (в першому періоді сушіння), якщо атмосферне повітря поступає в калорифер за $t_0 = 15\text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_0 = 0,8$ і нагрівається до $t_1 = 123\text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 1.15 Визначити густину вологого повітря за $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi = 80\%$, якщо абсолютний тиск $P_{\text{абс}} = 100\ 000\text{ Па}$.

Задача 1.16 Знайти ККД теоретичної сушарки, якщо стан повітря змінюється від $\varphi_0 = 0,7$ та $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ до $\varphi_2 = 0,6$ та $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$. Волога випаровується при температурі мокрого термометра.

Задача 1.17 Знайти середній потенціал сушіння в теоретичній сушарці за $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 0,7$ і $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 0,4$.

Задача 1.18 Знайти ККД теоретичної сушарки, якщо стан повітря змінюється від $\varphi_0 = 0,7$ та $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ до $\varphi_2 = 0,6$ та $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$. Волога випаровується при температурі мокрого термометра.

Задача 1.19 Знайти середній потенціал сушіння в теоретичній сушарці за $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 0,7$ і $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 0,4$.

Задача 1.20. Знайти кількість вологи, що випаровується при сушінні, якщо продуктивність сушарки за абсолютно сухим матеріалом 1200 кг/год . Початкова вологість матеріалу 75% , кінцева 10% (в перерахунку на абсолютно сухий матеріал).

Задача 1.21 Визначити температуру повітря, що надходить з калорифера в теоретичну сушарку, якщо різниця вологовмістів $\Delta d = 0,0192\text{ кг/кг}$, температура повітря після сушіння $t_2 = 45\text{ }^\circ\text{C}$, а його відносна вологість $\varphi = 62\%$.

Задача 1.22 В теоретичну сушарку потрапляє повітря з температурою $85\text{ }^\circ\text{C}$. При цьому потенціал сушіння $43\text{ }^\circ\text{C}$. Потенціал сушіння повітря, що покидає сушарку, $8\text{ }^\circ\text{C}$. Знайти парціальний тиск водяної пари в повітрі після сушарки, і об'ємний відсоток водяної пари в ньому, якщо $P = 750\text{ мм рт. ст.}$

2 ПРОЦЕС В ТЕОРЕТИЧНІЙ СУШАРЦІ

Приклад 2.1 В теоретичну сушарку (theoretical dryer) поступає повітря з параметрами $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_0 = 70\%$, підігрівається в калорифері і відбирає в матеріалі 150 кг/год вологи. Визначити витрату повітря і теплову потужність калорифера, якщо параметри повітря на виході з сушарки становлять: $t_2 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 50\%$.

Розв'язання

Визначаємо параметри вхідного і вихідного повітря:

0	2
$t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
$\varphi_0 = 70 \%$	$\varphi_2 = 30 \%$
$t_{0м} = 12,2 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{2м} = 34,7 \text{ }^\circ\text{C}$
$d_0 = 0,008 \text{ кг/кг}$	$d_2 = 0,032 \text{ кг/кг}$
$h_0 = 35 \text{ кДж/кг}$	$h_2 = 129 \text{ кДж/кг}$

Визначаємо витрату повітря

$$\ell = \frac{1}{d_2 - d_0} = \frac{1}{0,032 - 0,008} = 41,67 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

Питома витрата теплоти

$$q = \frac{h_2 - h_0}{d_2 - d_0} = \frac{129 \cdot 10^{-3} - 35 \cdot 10^3}{0,032 - 0,008} = 3917000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 3917 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Годинна витрата повітря

$$L = W \cdot \ell = 150 \cdot 41,67 = 6250,5 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

Теплова потужність калорифера

$$Q = \frac{q \cdot W}{3600} = \frac{3917 \cdot 150}{3600} = 163208 \text{ Вт} = 163 \text{ кВт}$$

Приклад 2.2 Визначити витрату (expense) повітря і теплоти в теоретичній сушарці для видалення з вологого матеріалу 100 кг/год вологи, якщо початковий стан повітря (до калорифера) такий: $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 0,8$, а на виході з сушарки: $t_2 = 44 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 0,5$.

Розв'язання

За h-d діаграмою знаходимо: $d_0 = 0,009$ кг/кг і $d_2 = 0,03$ кг/кг.
Визначаємо питому витрату сухого повітря

$$\ell = \frac{1}{d_2 - d_0} = \frac{1}{0,03 - 0,009} = 47,6 \frac{\text{кг}}{\text{кг випаруваної вологи}}$$

Питому витрату теплоти знаходимо, попередньо визначивши з h-d діаграми вологого повітря значення ентальпій. В умовах даного прикладу $h_2 = 121,5$ кДж/кг; $h_0 = 40$ кДж/кг

$$q = \frac{h_2 - h_0}{d_2 - d_0} = \frac{121,5 \cdot 10^3 - 40 \cdot 10^3}{0,03 - 0,009} = 3880 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг.}$$

Відповідно годинна витрата повітря становить

$$L = W \cdot \ell = 100 \cdot 47,6 = 4760 \text{ кг/год.}$$

Кількість теплоти

$$Q = Wq = \frac{100 \cdot 3880 \cdot 10^3}{3600} = 108000 \text{ Вт.}$$

Приклад 2.3 В сушильному апараті, що працює за звичайним варіантом, видаляється $W=1000$ кг/год вологи. Атмосферне повітря ($d_0 = 0,002$ кг/кг, $t_0 = 10$ °С) нагрівається в паровому калорифері, коефіцієнт теплопередачі в якому $k = 30$ Вт/(м²·К). Покази манометра (manometer) на паропроводі перед калорифером 100 кПа. Покази психрометра на повітропроводі після сушильного апарата $t_2 = 30$ °С, $t_{2m} = 25$ °С. Прийняти втрати теплоти в сушильному апараті $\Delta = 0,14q_v$, в калорифері $\Delta_{\text{кал}} = 0,06q_v$ (q_v – кількість теплоти, що витрачається тільки на випаровування вологи). Визначити:

- 1) температуру, з якою повітря поступає в сушильний апарат;
- 2) часткову витрату повітря і теплоти, а також потужність витяжного вентилятора (для теоретичних і реальних сушарок);
- 3) площу поверхні теплообміну калорифера;
- 4) витрату грілої пари (з врахуванням насичення пари).
- 5) тепловий ККД сушильного апарата.

Скласти схему процесу сушіння.

Розв'язання

Будуємо процес в h-d діаграмі. За h-d діаграмою знаходимо $h_0 = 15,5$ кДж/кг, $d_2 = 0,0177$ кг/кг, $h_2 = 75$ кДж/кг.

Теоретична сушарка

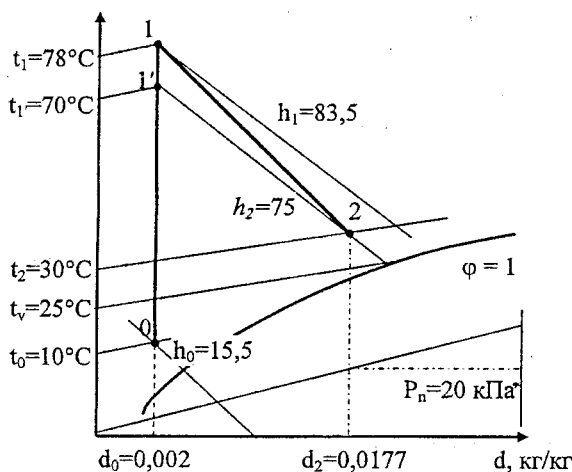


Рисунок 2.1 – Побудова процесу сушіння в h-d діаграмі

Проводимо вертикаль від точки 0 (рис. 2.1), яку знаходимо за значенням $d_0 = 0,002$ кг/кг та $t_0 = 10$ °С, до перетину з лінією $h_2 = 75$ кДж/кг в точці 1'. Ця точка характеризує склад повітря, який виходить з калорифера та потрапляє в теоретичну сушарку. Його температура $t_1 = 70$ °С.

Часткова витрата повітря

$$\ell_T = \frac{1}{d_2 - d_0} = \frac{1}{0,017 - 0,002} = 63,7 \text{ кг/кг}$$

Часткова витрата теплоти на випарювання вологи

$$q_T = \ell_T (h_2 - h_0) = 63,7(75 - 15,5) = 3800 \text{ кДж/кг}$$

Реальна сушарка

В цьому випадку:

$$h_1 - h_0 = (1 + \Delta)(h_2 - h_0) = 1,14(75 - 15,5) = 68 \text{ кДж/кг}$$

Звідси

$$h_1 = 68 + 15,5 = 83,5 \text{ кДж/кг}$$

Цьому значенню відповідає температура повітря, що поступає в сушарку від калориферів: $t_1 = 78$ °С (точка 1). Таким чином, процес сушіння в реальній сушарці відобразиться лінією 1-2.

Оскільки різниця вологовмістів повітря, що виходить з сушарки і потрапляє до неї, однакова для теоретичної і реальної сушарок

$$d_2 - d_0 = 0,0117 - 0,002 = 0,0157 \text{ кг/кг},$$

то і часткові витрати повітря будуть однакові.

$$\ell = \ell_T = 63,7 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Однаковими будуть також масові кількості і об'єми повітря, що висмоктуються вентилятором.

Кількість сухого повітря

$$L = L_T = \ell \cdot W = 63,7 \cdot 1000/3600 = 17,7 \text{ кг/с}.$$

Питомий об'єм вологого повітря

$$v = \frac{RT}{P - P_n} = \frac{287 \cdot (273 + 30)}{(745 - 20) \cdot 133,332} = 0,9 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Секундна витрата вологого повітря

$$V_c = L \cdot v = 17,7 \cdot 0,9 = 15,9 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Питома витрата теплоти (з врахуванням втрат в калорифері)

$$q = (1 + \Delta + \Delta_{\text{кал}}) q_T = (1 + 0,14 + 0,06) \cdot 3800 = 4580 \text{ кДж/кг}.$$

Загальна витрата теплоти

$$Q = W \cdot q = 0,278 \cdot 4580 = 1270 \text{ кВт}.$$

Середня різниця температур для прямиотечії

$$\Delta t_5 = 119,6 - 10 = 109,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\Delta t_m = 119,6 - 78 = 41,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температурний напір

$$\Delta t_{\text{сп}} = \frac{\Delta t_5 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_5}{\Delta t_m}} = \frac{109,6 - 41,6}{\ln \frac{109,6}{41,6}} = 70,3 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Поверхня теплообміну калорифера

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{1270}{30 \cdot 70,3} = 602 \text{ м}^2.$$

Витрата гріючої пари

$$G_m = \frac{Q}{r_m} = \frac{1270 \cdot 10^3}{2208 \cdot 10^3} = 0,574 \text{ кг/с}.$$

Тепловий ККД сушарки

$$\eta = \frac{r}{q} = \frac{2436 \cdot 9 \cdot 10^3}{4580 \cdot 10^3} = 0,53.$$

Значення теплоти пароутворення r беремо за температурою мокрого термометра (25°C), яка (для першого періоду сушіння) наближено рівна температурі випаровування вологи з поверхні матеріалу.

Приклад 2.4 Визначити витрати повітря і теплоти необхідні для висушування 1 тонни вологого матеріалу від вологості $u_{\text{п}} = 50\%$ до вологості $u_{\text{к}} = 6\%$ в теоретичній сушарці, що працює за нормальним варіантом (на продув). Визначити також параметри повітря після калорифера. Визначити необхідну потужність калорифера, якщо тривалість сушки 8 год, а вихідні параметри повітря $t_2 = 60^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 30\%$.

Розв'язання

Кількість випаруваної вологи при сушінні

$$W = G_{\text{п}} \cdot \frac{u_{\text{п}} - u_{\text{к}}}{100 - u_{\text{к}}} = 1000 \cdot \frac{50 - 6}{100 - 6} = 468 \text{ кг}.$$

Параметри точок з h-d діаграми

0	1	2
$t_0 = 25^\circ\text{C}$	$t_1 = 142^\circ\text{C}$	$t_2 = 60^\circ\text{C}$
$\varphi_0 = 48\%$	$\varphi < 5\%$	$\varphi_2 = 30\%$
$d_0 = 0,0015 \text{ кг/кг}$	$d_1 = 0,0015 \text{ кг/кг}$	$d_2 = 0,041 \text{ кг/кг}$
$h_0 = 46 \text{ кДж/кг}$	$h_1 = 167 \text{ кДж/кг}$	$h_2 = 167 \text{ кДж/кг}$

Витрата повітря

$$\ell = \frac{1}{d_2 - d_0} = \frac{1}{0,041 - 0,0015} = 31,8 \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{вологи}}.$$

Питома витрата теплоти

$$q = \ell \cdot (h_2 - h_0) = 31,8(167 - 46) = 386 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{вологи}}$$

Годинна витрата сухого повітря:

$$L_{\text{год}} = \frac{L_{\text{заг}}}{\tau} = \frac{\ell \cdot W}{\tau} = \frac{31,8 \cdot 468}{8} = \frac{14900}{8} = 1862,5 \text{ кг/год.}$$

Потужність калорифера:

$$Q_K = \frac{W \cdot q}{\tau \cdot 3600} = \frac{468 \cdot 3860}{8 \cdot 3600} = \frac{502}{8} = 62,75 \frac{\text{кВт}}{\text{год}}$$

Приклад 2.5 Визначити ККД повітряної сушарки для таких умов: процес сушіння йде за $h = 115$ кДж/кг, стан повітря змінюється від $\phi_0 = 0,8$, $t_0 = 20$ °С до $\phi_2 = 0,6$, $t_2 = 40$ °С.

Розв'язання

За допомогою h - d діаграми знаходимо характеристики повітря в робочих точках і визначаємо питому витрату теплоти (див. приклад 2.1), $q = 3820 \cdot 10^3$ Дж/кг. За таблицями водяної пари (додаток В) витрата теплоти на випаровування 1 кг води (теплота пароутворення) для $t_m = 33$ °С (або $h = 116$ кДж/кг) дорівнює $r = 2420 \cdot 10^3$ Дж/кг.

Отже, ККД сушарки

$$\eta = \frac{r}{q} = \frac{2420 \cdot 10^3}{3820 \cdot 10^3} \cdot 100 = 63,3 \%$$

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Задача 2.1 Визначити витрату повітря в теоретичній сушарці, якщо повітря з параметрами $t_0 = 20$ °С і $\phi_0 = 68$ % підігрівається в калорифері і відбирає з матеріалу 120 кг води, виходячи з сушарки з параметрами $t_2 = 48$ °С і $\phi_2 = 50$ %. Визначити теплову потужність калорифера.

Задача 2.2 В теоретичну сушарку поступає вологий матеріал і віддає 130 кг води. Визначити потужність калорифера і витрату повітря в сушарці, якщо вхідні і вихідні параметри повітря відповідно: $t_0 = 18$ °С, $\phi_0 = 68$ %, $t_2 = 45$ °С і $\phi_2 = 55$ %.

Задача 2.3 Визначити кількість води, яка випаровується з вологого матеріалу за 1 годину при сушінні його повітрям з початковими параметрами $t_0 = 22$ °С і $d_0 = 0,008$ кг/кг, якщо його витрата складає 6000 м³/год.

Параметри відпрацьованого повітря: $t_2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 55 \%$. Визначити також потужність калорифера.

Задача 2.4 Годинна витрата повітря в теоретичній сушарці складає $3600 \text{ м}^3/\text{год}$, за теплової потужності калорифера 150 кВт . Визначити, яку кількість води відбере з матеріалу повітря з початковими параметрами $t_0 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 72 \%$, якщо сушарка працює на продув (за нормальним варіантом), а вихідні параметри повітря складають: $t_2 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 55 \%$.

Задача 2.5 Визначити годинну витрату повітря з параметрами $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ і $d_0 = 0,01 \text{ кг/кг}$, якщо в теоретичній сушарці випаровується 200 кг/год води. Вологовміст відпрацьованого повітря $d_2 = 0,06 \text{ кг/кг}$, а його температура $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити також теплову потужність калорифера.

Задача 2.6 Визначити витрату повітря з параметрами $t_0 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ і $d_0 = 0,009 \text{ кг/кг}$ і теплову потужність, необхідні для висушування 5 тонн вологого матеріалу від вологовмісту $u_n = 0,5 \text{ кг/кг}$ до вологовмісту $u_k = 0,06 \text{ кг/кг}$ в теоретичній сушарці, що працює на продув. Визначити також параметри повітря після калорифера і необхідну потужність калорифера, якщо тривалість сушіння 8 годин , а параметри відпрацьованого повітря $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 35 \%$.

Задача 2.7 Визначити параметри повітря після калорифера, витрату повітря і необхідну потужність калорифера, якщо тривалість сушіння 4 тонн вологого матеріалу з початковим вологовмістом $u_n = 0,6 \text{ кг/кг}$ становить 8 годин , а параметри вхідного і відпрацьованого повітря відповідно: $t_0 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 72 \%$; $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 35 \%$. Кінцевий вологовміст матеріалу $u_k = 0,065 \text{ кг/кг}$.

Задача 2.8 Яким буде кінцевий вологовміст 5 тонн матеріалу з вологістю 70% , якщо за 7 годин сушіння в теоретичній сушарці повітрям з початковими параметрами $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 60 \%$ використали теплоту $Q = 360 \text{ МДж}$. Параметри вихідного повітря складають $t_2 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 55 \%$.

Задача 2.9 Вологий матеріал висушується в сушарці з калорифером потужністю 60 кВт , від вологості $w_n = 50 \%$ до вологості $w_k = 14 \%$. Визначити годинну витрату повітря, якщо $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 60 \%$ і $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 35 \%$, відповідно. Визначити годинну витрату вологого матеріалу. Пусковим періодом знехтувати.

Задача 2.10 Визначити параметри повітря після калорифера, витрату повітря і необхідну потужність калорифера, якщо тривалість сушіння 2 тонн вологого матеріалу з початковим вологовмістом $u_n = 0,6 \text{ кг/кг}$ становить 6 годин , а параметри вхідного і відпрацьованого повітря відповідно $t_0 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 72 \%$; $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 35 \%$. Кінцева вологість матеріалу $w_k = 6,5 \%$.

Задача 2.11 Визначити витрату повітря і необхідну потужність калорифера, якщо тривалість сушіння 500 кг яблук з початковим вологовмістом $u_n = 0,6 \text{ кг/кг}$ становить 12 годин , а параметри вхідного і відпрацьованого повітря відповідно $t_0 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 72 \%$; $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 35 \%$. Кінцева воло-

гість готового продукту $w_k = 14\%$.

Задача 2.12 Потужність калорифера в сушарці для сушіння чорносливу складає 50 кВт. Якою має бути тривалість сушіння 500 кг слив з початковою вологістю 80 % до вологості 21 %, якщо повітря на калорифер подається з параметрами $t_0 = 22\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 82\%$, а його витрата складає 30 кг/кг вологи.

Задача 2.13 Визначити годинну витрату сушильного агента і час сушіння 2 тонн вологого матеріалу від вологовмісту $u_n = 0,8$ кг/кг до вологовмісту $u_k = 0,08$ кг/кг, якщо потужність калорифера для підігріву повітря складає 100 кВт, а вхідні і вихідні параметри сушильного агента складають, відповідно: $t_0 = 10\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 58\%$, $t_2 = 55\text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 65\%$.

Задача 2.14 Годинна витрата сушильного агента для сушіння 1 тонни яблук складає 1800 кг/год, а його початкові параметри: $t_0 = 10\text{ }^\circ\text{C}$, $d_0 = 7$ г/кг. Визначити необхідну потужність калорифера і час сушіння яблук від початкової вологості $w_n = 84\%$ до кінцевої $w_k = 14\%$, якщо повітря залишає сушарку з температурою сухого термометра $t_c = 57\text{ }^\circ\text{C}$ і мокрого $t_m = 53\text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 2.15 Визначити кількість вологи, яка випаровується з вологого матеріалу за 2 години при сушінні його повітрям з початковими параметрами $t_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ і $d_0 = 0,012$ кг/кг, якщо його витрата складає 3600 м³/год. Параметри відпрацьованого повітря: $t_2 = 45\text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 55\%$. Визначити також потужність калорифера.

Задача 2.16 Визначити, яку кількість вологи відбере з матеріалу повітря з початковими параметрами $t_0 = 19\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 72\%$, якщо сушарка працює на продув, а вихідні параметри повітря складають: $t_2 = 70\text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 55\%$. Годинна витрата повітря в теоретичній сушарці складає 3600 м³/год, при тепловій потужності калорифера 200 кВт.

Задача 2.17 Визначити теплову потужність калорифера та годинну витрату повітря з параметрами $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ і $d_0 = 0,01$ кг/кг, якщо в теоретичній сушарці випаровується 100 кг/год вологи. Вологовміст відпрацьованого повітря $d_2 = 0,07$ кг/кг, а його температура 60 °С. Тривалість сушіння 3 години. Матеріал сушиться тільки в періоді постійної швидкості сушіння.

Задача 2.18 Визначити параметри повітря після калорифера, необхідну потужність калорифера, витрату повітря з параметрами $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ і $d_0 = 0,009$ кг/кг і теплову потужність, необхідні для висушування 10 тонн вологого матеріалу від вологовмісту $u_n = 0,5$ кг/кг до вологовмісту $u_k = 0,06$ кг/кг в теоретичній сушарці, що працює на продув. Тривалість сушіння 16 годин, а параметри відпрацьованого повітря $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_0 = 35\%$.

Задача 2.19 Визначити поверхню нагрівання вальцевої вакуум-сушарки продуктивністю 200 кг/год (за сухим матеріалом). Початкова вологість 50 %, кінцева 5 % (на загальну масу). Коефіцієнт тепловіддачі 348 Вт/(м²·К), температура сушіння 50 °С, теплоємність сухого матеріалу $1,26 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), початкова температура матеріалу 20 °С, тиск гріючої пари $P_{\text{абс}} = 150$ кПа. Втрата теплоти складає 10 % від загальної кількості

теплоти, яка віддається гріючим паром.

Задача 2.20 В сушарці продуктивністю 1 т/год (за вологим матеріалом) висушується матеріал від 55 до 8 % вологості (на загальну масу). Атмосферне повітря має параметри $t_0 = 20$ °С, $\phi_0 = 0,75$ і нагрівається в калорифері до $t_1 = 110$ °С. Потенціал сушіння на виході із сушарки $\chi_2 = 10$ °С. Знайти витрату повітря і грійної пари за тиску пари $P_{\text{абс}} = 250$ кПа і міри сухості 95 %.

Задача 2.21 Продуктивність сушарки, що працює за нормальним сушильним варіантом, 500 кг/год (за висушеним продуктом). В ній висушується матеріал від 42 % до 9 %. Температура повітря перед калорифером $t_0 = 20$ °С, а його точка роси $t_p = 8$ °С. Процес протікає за $h = 125$ кДж/кг. Температура повітря на виході із сушарки $t_2 = 45$ °С. Визначити витрату грійної пари і поверхню нагрівання калорифера, якщо тиск пари 200 кПа і вологість 5%, а коефіцієнт теплопередачі $k = 31,5$ Вт/(м²·К). Втрата теплоти в навколишнє середовище складає 50 % від корисно витраченої.

Задача 2.22 Повітря з температурою 60 °С та $\phi = 0,2$ охолоджується холодною водою в трубчастому протиструминному теплообміннику до точки роси. Охолоджуюча вода нагрівається від 15 до 20 °С. Визначити кількість повітря, парціальний об'ємний відсоток пари в повітрі, а також витрату охолоджуючої води, якщо поверхня теплообмінника 15 м², а коефіцієнт теплопередачі $k = 46,4$ Вт/(м²·К).

Задача 2.23 Знайти температуру і вологовміст повітря після теоретичної сушарки, якщо середній потенціал сушіння $\chi_{\text{ср}} = 41$ °С. Повітря поступає в калорифер за $t_0 = 15$ °С, $\phi_0 = 70$ %. Ентальпія повітря, що надходить із калорифера в сушарку, $h = 144,2$ кДж/кг. Визначити також температуру сухого матеріалу в першому періоді сушіння.

3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОГОГО МАТЕРІАЛУ

Приклад 3.1 Знайти вологість матеріалу у відсотках від маси сухої речовини, якщо відомо, що його вологість дорівнює 37 % від загальної маси.

Розв'язання

Скористаємося рівнянням матеріального балансу

$$w^c = \frac{100 \cdot w}{100 - w} = \frac{100 \cdot 37}{100 - 37} = 58,7\%.$$

Приклад 3.2 Визначити кількість води, що підлягає видаленню, при сушінні 1 тонни вологого матеріалу за годину від $w_n = 40$ % до $w_k = 2$ %. Вологість дана у відсотках від загальної маси.

Розв'язання

Це завдання розв'язується за допомогою рівняння матеріального балансу (аналогічно випаровуванню).

Підставляючи в рівняння відповідні числові значення, отримаємо

$$W = G_H \frac{w_n - w_k}{100 - w_k} = 1000 \frac{40 - 2}{100 - 2} = 388 \text{ кг/год.}$$

Приклад 3.3 Визначити час сушіння матеріалу від 36 до 5,5 % вологості за постійних умовах сушіння, якщо відомо, що цей матеріал висихає протягом 5 годин від 36 % до 8 % (в перерахунку на абсолютно суху речовину). Критична вологість матеріалу 14 %. Задачу розв'язати без врахування рівноважного вологовмісту.

Розв'язання

Відповідні вологовмісти матеріалу складуть:

$$u_n = \frac{36}{100} = 0,36; \quad u_{кр} = \frac{14}{100} = 0,14;$$

$$u_k = \frac{5,5}{100} = 0,055; \quad u'_k = \frac{8}{100} = 0,08;$$

Знаходимо величину коефіцієнта сушіння k із спрощеного рівняння кінетики сушіння

$$\tau = \frac{u_n - u_{кр}}{k} + \frac{u_{кр}}{k} \ln \frac{u_{кр}}{u_k},$$
$$\tau = \frac{0,36 - 0,14}{k} + \frac{0,14}{k} \ln \frac{0,14}{0,08},$$

звідки

$$k = 0,06 \frac{\text{кг вологи}}{\text{с} \cdot \text{кг сухої речовини}}$$

Отже, в умовах прикладу час сушіння

$$\tau = \frac{0,36 - 0,14}{0,06} + \frac{0,14}{0,06} \cdot \ln \frac{0,14}{0,055} = 5,86 \text{ год.}$$

Приклад 3.4 Для сушіння вологого матеріалу з 33 % до 9 % вологості (в перерахунку на абсолютно суху речовину) у промисловій сушарці, знадобилося 7 годин. Критична вологість 16 %, а рівноважна 5 %. Потрібно визначити час, необхідний для сушіння цього матеріалу від 37 % до 7 % вологості, якщо умови сушіння залишаються без змін. Початковим пусковим періодом знехтувати.

Розв'язання

Визначимо коефіцієнт швидкості сушіння k для періодів постійної і падаючої швидкості сушіння.

Оскільки в умові задачі вологість дана на суху масу, відповідні вологовмісти матеріалу складуть

$$u_n = \frac{33}{100} = 0,33; \quad u_p = \frac{5}{100} = 0,05;$$

$$u_{кр} = \frac{16}{100} = 0,16; \quad u'_n = \frac{37}{100} = 0,37;$$

$$u_k = \frac{9}{100} = 0,09; \quad u'_k = \frac{7}{100} = 0,07;$$

Тривалість першого періоду сушіння

$$\tau_1 = \frac{u_n - u_{кр}}{k} = \frac{0,33 - 0,16}{k} = \frac{0,17}{k}$$

Тривалість другого періоду

$$\tau_2 = \frac{u_{кр} - u_p}{k} \cdot \ln \frac{u_{кр} - u_p}{u_k - u_p} = \frac{0,16 - 0,05}{k} \cdot \ln \frac{0,16 - 0,05}{0,09 - 0,05} = \frac{0,111}{k}$$

Загальна тривалість сушіння за умовами задачі дорівнює 7 год.

Отже

$$\tau_1 + \tau_2 = 7 = \frac{0,17}{k} + \frac{0,111}{k} = \frac{0,281}{k}$$

звідки

$$k = 0,0402 \frac{\text{кг вологи}}{\text{с} \cdot \text{кг сухої речовини}}$$

За нових умов

$$\tau_1 = \frac{0,37 - 0,16}{0,0402} = 5,22 \text{ год.}$$

$$\tau_2 = \frac{0,16 - 0,05}{0,1402} \cdot \ln \frac{0,16 - 0,05}{0,09 - 0,05} = 4,66 \text{ год.}$$

Загальний час, потрібний для сушіння

$$\tau = 5,22 + 4,66 = 9,9 \text{ год.}$$

Приклад 3.5 Для сушіння волого матеріалу з 33 % до 9 % вологовмісту (в перерахунку на абсолютну суху речовину) в промисловій сушарці, необхідно 7 годин, при цьому критичний вологовміст $u_k = 16$ %, а рівноважний 5 %. Який час необхідний для сушіння цього матеріалу від 37 % до 7 % вологості за тих самих умов сушіння. Пусковим періодом знехтувати.

Розв'язання

Визначимо період постійної і падаючої швидкості сушіння.

Тривалість першого періоду

$$\tau_1 = \frac{u_n - u_{кр}}{k} = \frac{0,33 - 0,16}{k} = \frac{0,17}{k}$$

Тривалість другого періоду

$$\tau_2 = \frac{u_{кр} - u_p}{k} = \ln \frac{u_{кр} - u_p}{u_k - u_p} = \frac{0,16 - 0,05}{k} \ln \frac{0,16 - 0,05}{0,09 - 0,05} = 0,111.$$

Загальна тривалість сушіння

$$\tau_1 + \tau_2 = 7 = \frac{0,17}{k} + \frac{0,111}{k} = \frac{0,281}{k}$$

$$k = \frac{0,281}{7} = 0,0402.$$

Для умови $u_n = 37$ % і $u_k = 7$ %.

$$\tau_1 = \frac{0,37 - 0,16}{0,0402} = 5,22 \text{ год.}$$

$$\tau_2 = \frac{0,16 - 0,05}{0,0402} \ln \frac{0,16 - 0,05}{0,07 - 0,05} = 4,66 \text{ год.}$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 5,22 + 4,66 = 9,9 \text{ год.}$$

Приклад 3.6 Матеріал висушується в протиструминній сушарці безперервної дії від 50 % до 3,5 % вологи, в перерахунку на загальну масу. Продуктивність сушарки за вологим матеріалом 2260 кг/год. Густина сухого матеріалу 640 кг/м³. На 1 кг сухого матеріалу приходится 0,0615 м² поверхні випаровування. Температура повітря на виході з сушарки t₂ = 63 °С,

У першому періоді сушіння, коли поверхня матеріалу насичена вологою, швидкість сушіння склала 2,44 кг вологи з 1 м² на годину. Повітря, яке застосовувалося в цьому випадку мало вологовміст на виході 0,0306 кг/кг. Вологовміст насиченого повітря при заданій температурі матеріалу 0,0495 кг/кг. Визначити необхідну тривалість сушіння. Випаровування вважати адіабатним.

Розв'язання *

Визначаємо сушильний коефіцієнт (на одиницю різниці вологовмістів)

$$k = \frac{2,44}{0,0495 - 0,0306} = 129 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год.}$$

Визначаємо тривалість адіабатного сушіння, тобто того періоду, в якому вся поверхня матеріалу насичена вологою.

Задаючись t₀ = 20 °С, φ₀ = 0,5, за h-d діаграмою знаходимо d₀ = 7,5 $\frac{\text{г}}{\text{кг}}$.

Кількість випаруваної вологи за годину

$$W = G_m \frac{w_n - w_k}{100 - w_k} = 2260 \frac{50 - 3,5}{100 - 3,5} = 1089 \text{ кг/год.}$$

Годинна витрата сухого повітря

$$L = W \frac{1}{d_2 - d_0} = 1089 \frac{1}{0,0306 - 0,0075} = 49700 \text{ кг/год.}$$

Сушильна площа

$$F_1 = \frac{L}{k} \ln \frac{d_{\text{нас}} - d_1}{d_{\text{нас}} - d_2} = \frac{49700}{129} \cdot \ln \frac{0,0495 - 0,0124}{0,0495 - 0,0306} = 755,7 \text{ м}^2.$$

Для заданої продуктивності сушарки годинна подача матеріалу відповідає поверхні випаровування:

$$A = (G - W) \cdot f_1 = (2260 - 1089) \cdot 0,0615 = 72 \text{ м}^2/\text{год}.$$

Таким чином сушарка має містити кількість матеріалу, завантаженого протягом $\tau = \frac{755,7}{72} = 10,49$ год.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Задача 3.1 Який час необхідний для сушіння матеріалу від 37 % до 7 % вологості, якщо для висушування цього матеріалу з 32 % до 9 % відносної вологості промисловій сушарці необхідно 10 годин. Критичний вологовміст $u_{кр} = 0,16$ кг/кг, а рівноважний $u_p = 0,05$ кг/кг. Умови сушіння вважати однаковими в обох випадках. Пусковим періодом знехтувати.

Задача 3.2 Вологий матеріал з початковою вологою 33 %, критичною 17 % і рівноважною 2 % висушується за постійних умов сушіння до 9 % вологості протягом 8 годин. Визначити тривалість сушіння до 3 % вологості в тих же умовах. Вологість дана в відсотках від маси абсолютно сухого матеріалу.

Задача 3.3 Визначити коефіцієнт сушіння і час, необхідний для сушіння матеріалу від 40 % до 8 % вологості, якщо для висушування цього матеріалу з 32 % до 9 % відносної вологості промисловій сушарці необхідно 6 годин. Критичний вологовміст $u_{кр} = 0,12$ кг/кг, а рівноважний $u_p = 0,06$ кг/кг. Пусковим періодом знехтувати.

Задача 3.4 Тривалість першого періоду сушіння вологого матеріалу з вологістю 60 % становить 6 годин. Визначити загальний час сушіння, якщо критична вологість матеріалу 20 %, рівноважна 7 %, кінцева 14 %

Задача 3.5 За перший період сушіння, який становив 5 годин, вологовміст матеріалу знизився від $u_n = 0,72$ кг/кг до $u_{кр} = 0,18$ кг/кг. Якою має бути загальна тривалість сушіння, щоб висушити матеріал до $w_x = 6$ %. Рівноважна вологість матеріалу $w_p = 4$ %.

Задача 3.6 Визначити час, необхідний для сушіння матеріалу від 42 % до 8 % вологості, якщо для висушування цього матеріалу з 31 % до 10 % відносної вологості промисловій сушарці необхідно 6 годин. Критичний вологовміст $u_{кр} = 0,12$ кг/кг, а рівноважний $u_p = 0,06$ кг/кг. Визначити коефіцієнт сушіння. Пусковим періодом знехтувати.

Задача 3.7 Визначити загальний час сушіння, якщо критична вологість матеріалу 25 %, рівноважна 7 %, кінцева 14 %. Тривалість першого періоду сушіння вологого матеріалу з вологістю 60 % становить 8 годин.

Задача 3.8 Якою має бути загальна тривалість сушіння, щоб висушити матеріал до $w_x = 6$ %. Рівноважна вологість матеріалу $w_p = 4$ %. За перший період сушіння, який становив 7 годин, вологовміст матеріалу знизився від $u_n = 0,65$ кг/кг до $u_{кр} = 0,18$ кг/кг.

Задача 3.9 Визначити коефіцієнт сушіння і час, необхідний для сушіння матеріалу від 45 % до 8 % вологості, якщо для висушування цього матеріалу з 30 % до 9 % вологості промисловій сушарці необхідно 6 годин. Критичний вологовміст $u_{кр} = 0,12$ кг/кг, а рівноважний $u_p = 0,06$ кг/кг. Пусковий період становить 30 хвилин.

Задача 3.10 Пусковий період сушіння становить 1 годину. Тривалість першого періоду сушіння вологого матеріалу з вологістю 65 % становить 6 годин. Визначити загальний час сушіння, якщо критична вологість матеріалу 20 %, рівноважна 4 %, кінцева 14 %.

Задача 3.11 Якою має бути загальна тривалість сушіння, щоб висушити матеріал до $w_k = 6$ %. За перший період сушіння, який становив 6 годин, вологовміст матеріалу знизився від $u_n = 0,52$ кг/кг до $u_{кр} = 0,15$ кг/кг. Рівноважна вологість матеріалу $w_p = 5$ %.

4 ІНТЕНСИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ВИПАРОВУВАННЯ

Приклад 4.1 Визначити кількість вологи, що випаровується в 1 год з 1 м^3 горизонтальної поверхні довжиною $\ell = 0,1 \text{ м}$ в напрямку руху повітря, якщо швидкість повітря $\omega = 3 \text{ м/с}$, його температура $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Тиск суміші 98 кПа . Температура води $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Парціальний тиск пари над поверхнею і в повітрі відповідно $P_{\text{н}} = 1,7 \text{ кПа}$, $P_{\text{с}} = 0,775 \text{ кПа}$. Кінематична в'язкість $\nu = 1,56 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Розв'язання

Коефіцієнт концентраційної дифузії

$$D_{\text{C}} = 2,2 \cdot 10^{-5} \left(\frac{273 + 20}{273} \right)^{1,8} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^5}{0,98 \cdot 10^5} \right) = 2,38 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega \cdot \ell}{\nu} = \frac{3 \cdot 0,1}{1,56 \cdot 10^{-5}} = 19230$$

Критерій Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{D_{\text{C}}} = \frac{1,56 \cdot 10^{-5}}{2,38 \cdot 10^{-5}} = 0,655$$

Критеріальне масообмінне рівняння

$$Nu = 0,347 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^{0,132}$$

Критерій Гухмана

$$Gu = \frac{\dot{T}_{\text{с}} - T_{\text{м}}}{T_{\text{с}}}$$

Критерій Нуссельта

$$Nu = 0,347 \cdot 19230^{0,65} \cdot 0,655^{0,33} = 44,9$$

Коефіцієнт масообміну (концентраційний)

$$\beta_{\text{C}} = \frac{Nu \cdot D_{\text{C}}}{\ell} = \frac{44,9 \cdot 2,38 \cdot 10^{-5}}{0,1} = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Коефіцієнт масообміну (тисковий)

$$\beta_{\text{P}} = \frac{\beta_{\text{C}}}{R_{\text{П}} T} = \frac{0,1}{\frac{8314}{18} \cdot (273 + 15)} = 7,5 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}} \right]$$

Інтенсивність випаровування

$$I = \beta_p \cdot (P_{\Pi} - P_C) = 7,5 \cdot 10^{-7} \cdot (1700 - 775) = \\ = 6,95 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 6,95 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 = 2,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}$$

Кількість вологи

$$W = I \cdot F \cdot \tau = 2,5 \cdot 1 \cdot 1 = 2,5 \text{ кг.}$$

Приклад 4.2 Визначити кількість вологи, що випаровується за 10 год з 1 м^3 стрічки сушарки шириною 0,8 м, якщо швидкість повітря $\omega = 5 \text{ м/с}$, його температура $60 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi = 18 \%$. Тиск суміші 100 кПа. Температура си- ровини $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Кінематична в'язкість $\nu = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Розв'язання

Коефіцієнт концентраційної дифузії

$$D_C = 2,2 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,8} \cdot \left(\frac{P_0}{P} \right) = 2,2 \cdot 10^{-5} \left(\frac{273 + 60}{273} \right)^{1,8} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^5} \right) = 3,146 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega \cdot \ell}{\nu} = \frac{5 \cdot 0,8}{1,2 \cdot 10^{-5}} = 3,3 \cdot 10^5$$

Критерій Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{D_C} = \frac{1,2 \cdot 10^{-5}}{3,146 \cdot 10^{-5}} = 0,38$$

Критеріальне рівняння

$$Nu = 0,347 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^{0,132}$$

Критерій Гухмана

$$Gu = \frac{T_C - T_m}{T_C} = \frac{333 - 318}{333} = 0,045$$

Критерій Нуссельта

$$Nu_{\Gamma} = 0,347 \cdot (3,3 \cdot 10^5)^{0,65} \cdot 0,38^{0,33} \cdot 0,045^{0,132} = 641$$

Коефіцієнт масообміну (концентраційний)

$$\beta_c \frac{\text{Nu} \cdot D_c}{\ell} = \frac{641 \cdot 3,146 \cdot 10^{-5}}{0,8} = 0,025 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці парціальних тисків

$$\beta_p = \frac{\beta_c}{R_{\text{ПТ}}} = \frac{0,025}{\frac{8314}{18} \cdot (273 + 45)} = 1,7 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}} \right]$$

Інтенсивність випаровування

$$\begin{aligned} I &= \beta_p \cdot (P_{\text{П}} - P_c) = 1,7 \cdot 10^{-7} \cdot 0,7 \cdot 10^3 = 1,19 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = \\ &= 1,99 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 = 0,4284 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}} \end{aligned}$$

Кількість випаруваної вологи

$$W = I \cdot F \cdot \tau = 0,4284 \cdot 1 \cdot 10 = 4,284 \text{ кг.}$$

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Задача 4.1 Визначити кількість вологи, що випаровується за 10 годин з 1 м² стрічки сушарки шириною 0,8 м, якщо швидкість повітря над сировиною 5 м/с, а його температура 60 °С і відносна вологість φ = 18 %. Тиск суміші 100 кПа. Температура сировини 45 °С. Перепад парціальних тисків водяної пари над сировиною і в повітрі ΔP = 0,7 кПа.

Задача 4.2 Волога випаровується з 1 м² стрічки сушарки шириною 0,1 м, якщо швидкість повітря над сировиною 0,9 м/с, а його температура 60 °С. Тиск суміші 100 кПа. Температура сировини 45 °С. Перепад парціальних тисків водяної пари над сировиною і в повітрі ΔP = 0,7 кПа. Коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря ν = 1,897 · 10⁻⁵ м²/с. Визначити кількість вологи, випаруваної за 20 годин.

Задача 4.3 Швидкість повітря над сировиною в стрічковій сушарці 4 м/с, а його температура 65 °С при відносній вологості φ = 14 %. Тиск суміші 100 кПа. Температура сировини 45 °С. Визначити кількість вологи, що випаровується за 10 годин з 1 м² стрічки сушарки шириною 0,5 м.

Задача 4.4 Швидкість повітря над сировиною в тунельній сушарці, в якій сушаться сливи, 4 м/с, а його температура 55 °С при відносній вологості φ = 20 %. Тиск суміші 98 кПа. Температура сировини 45 °С. Перепад парціальних тисків водяної пари над сировиною і в повітрі ΔP = 0,65 кПа. Визначити кількість вологи, що випаровується за 40 годин з 1 піддона вагонетки сушарки розмірами 1 × 0,5 м.

Задача 4.5 Швидкість повітря над сировиною в тунельній сушарці, в якій сушаться сливи, 3 м/с, а його температура 60 °С. Тиск суміші 98 кПа. Температура сировини 45 °С. Перепад парціальних тисків водяної пари над сировиною і в повітрі $\Delta P = 0,75$ кПа. Коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu = 1,897 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Визначити кількість вологи, що випаровується за 40 годин з 1 вагонетки сушарки, яка містить 15 піддонів розмірами 1×0,5 м.

Задача 4.6 В стрічковій сушарці сушаться порізані яблука при температурі 50 °С. Швидкість повітря над сировиною 0,8 м/с, а його температура 65 °С за відносної вологості $\phi = 20$ %. Тиск суміші 100 кПа. Визначити кількість вологи, що випаровується за 12 годин з 1 стрічки сушарки розмірами 5×0,5 м.

Задача 4.7 Яка кількість вологи, випаровується за 5 годин з 1 піддона камерної сушарки розмірами 1×0,5 м. Температура сировини 50 °С. Швидкість повітря над сировиною 0,6 м/с, а його температура 55 °С. Тиск суміші 101 кПа. Парціальний тиск водяної пари над сировиною $P_c = 1,75$ кПа. Парціальний тиск водяної пари в повітрі $P_n = 0,75$ кПа.

Задача 4.8 Визначити необхідну прохідну потужність конденсатовідвідника, якщо площа піддонів в камерній сушарці 25 м². Температура сировини 47 °С. Швидкість повітря над сировиною 3 м/с, а його температура 55 °С за відносної вологості $\phi = 16$ %. Тиск суміші 101 кПа. Ширина піддона 1 метр.

Задача 4.9 Температура слив, що сушаться в тунельній сушарці, 37 °С. Швидкість повітря над сировиною 3 м/с, а його температура 55 °С. Тиск суміші 100 кПа. Парціальний тиск водяної пари над сировиною $P_c = 2$ кПа. Кінематична в'язкість $\nu = 1,84 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Парціальний тиск водяної пари в повітрі $P_n = 0,75$ кПа. Визначити кількість сконденсованої вологи, якщо площа піддонів в вагонетці сушарки 100 м², а ширина піддона 0,6 м.

Задача 4.10 Площа піддонів в камерній сушарці 25 м². Температура сировини 42 °С. Швидкість повітря над сировиною 8 м/с, а його температура 55 °С за відносної вологості $\phi = 12$ %. Тиск суміші 103 кПа. Визначити необхідну прохідну потужність конденсатовідвідника.

5 ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС СУШИЛЬНИХ УСТАНОВОК

Приклад 5.1 Скласти тепловий баланс неперервно діючої протиструминної сушарки, що працює за нормальним варіантом, визначити витрату повітря і його ентальпію після калориферів, якщо витрата вологого матеріалу $G_m = 350$ кг/год, початкова і кінцева вологості матеріалу відповідно 42% і 11 %, температура матеріалу, що поступає і виходить із сушарки відповідно $\theta_1 = 18$ °С і $\theta_2 = 47$ °С, стан повітря до калорифера і після сушіння відповідно: $t_1 = 15$ °С; $\phi_0 = 70$ %; $t_2 = 55$ °С; $\phi_0 = 50$ %, теплоємність матеріалу, висушеного до кінцевого вологовмісту 0,11 кг/кг, становить 2,35 кДж/(кг·К), маса сталюого транспортера $G_{тр} = 600$ кг, а теплоємність сталі 0,5 кДж/(кг·К). Теплові втрати сушарки в навколишнє середовище складають 12 %.

Розв'язання

Кількість випарованої в сушарці вологи

$$W = G_n \frac{w_n - w_k}{100 - w_k} = 350 \frac{42 - 11}{100 - 11} = 122 \text{ кг / год.}$$

За діаграмою вологого повітря знаходимо

$$d_0 = 0,0077 \text{ кг/кг; } h_0 = 35 \text{ кДж/кг; } d_2 = 0,38 \text{ кг/кг; } h_2 = 145 \text{ кДж/кг.}$$

Витрата сухого повітря на випаровування вологи

$$L = \frac{W}{d_2 - d_0} = \frac{122}{0,038 - 0,0077} = 4030 \text{ кг / год.}$$

Витрата теплоти в теоретичній сушарці

$$Q = L \cdot (h_2 - h_0) = \frac{4030(145 - 35)}{3600} = 123 \text{ кВт.}$$

Витрата теплоти на підігрів матеріалу, що висушується

$$G_m \cdot c_m (\theta_2 - \theta_1) = \frac{(350 - 122) \cdot 2,35 \cdot (47 - 18)}{3600} = 4,3 \text{ кВт.}$$

Витрата теплоти на нагрів транспортних засобів

$$G_{тр} \cdot c_{тр} (\theta_2 - \theta_1) = \frac{600 \cdot 0,5 \cdot (47 - 18)}{3600} = 2,42 \text{ кВт.}$$

Теплота, що вноситься з транзитною вологою

$$W \cdot \theta_1 \cdot c_p = \frac{122 \cdot 18 \cdot 4,19}{3600} = 2,56 \text{ кВт.}$$

Загальна кількість теплоти, за рівнянням теплового балансу, з врахуванням втрат в навколишнє середовище

$$Q = L(h_2 - h_0) + G_m \cdot c_m (\theta_2 - \theta_1) + G_{\text{вп}} \cdot c_{\text{вп}} (\theta_2 - \theta_1) + W \cdot \theta_1 \cdot c_p.$$

Тоді

$$Q = (123 + 4,3 + 2,42 + 2,56) \cdot 1,12 = 142,5 \text{ кВт.}$$

Знаючи повні теплові втрати в сушарці, можна визначити ентальпію повітря після підігріву в калорифері, користуючись рівнянням

$$Q = L(h_1 - h_0),$$

звідки

$$h_1 = h_0 + \frac{Q}{L} = 350 + \frac{142,5 \cdot 3600}{4,030} = 162,5 \text{ кДж/кг.}$$

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Задача 5.1 Протиструминна сушарка працює за нормальним режимом, з витратою вологого матеріалу 500 кг/год. Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 45 % і 16 %, а його температура на вході і виході відповідно: $\theta_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 47 \text{ }^\circ\text{C}$, стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70 \text{ \%}$; $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50 \text{ \%}$. Теплоємність матеріалу за $c_k = 0,14$ становить 2,5 кДж/(кг·К). Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо втрати в навколишнє середовище складають 21%.

Задача 5.2 Початкова і кінцева вологість матеріалу що сушиться в протиструминній сушарці, яка працює за нормальним режимом відповідно 55 % і 14 %, а його температура на вході і виході відповідно $\theta_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 52 \text{ }^\circ\text{C}$, стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70 \text{ \%}$; $t_2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 40 \text{ \%}$. Теплоємність матеріалу за $c_k = 0,08$ становить 1,85 кДж/(кг·К). Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо витрата вологого матеріалу 900 кг/год, а втрати в навколишнє середовище складають 11%.

Задача 5.3 Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо вона працює за нормальним режимом, з витратою вологого матеріалу 1500 кг/год. Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 50 % і 18 %, а його температура на вході і виході відповідно $\theta_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$, стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 72 \text{ \%}$; $t_2 = 53 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50 \text{ \%}$.

Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,14$ становить $2,5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, втрати в навколишнє середовище складають 21 %. Рух матеріалу і повітря протиструминний.

Задача 5.4 Стрічкова сушарка працює за нормальним режимом, з витратою вологого матеріалу 700 кг/год . Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 75 % і 14 %, а його температура на вході і виході відповідно $\theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,18$ становить $2,55 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Скласти тепловий баланс сушарки, якщо втрати в навколишнє середовище складають 8 %. Стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70 \text{ \%}$; $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50 \text{ \%}$.

Задача 5.5 Протиструминна тунельна сушарка працює за нормальним режимом, з витратою вологого матеріалу 2500 кг/год . Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 45 % і 24 %. Стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70 \text{ \%}$; $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50 \text{ \%}$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,18$ становить $2,7 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо втрати в навколишнє середовище складають 13 %, а температура повітря на вході і виході відповідно $\theta_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 57 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 5.6 Початкова і кінцева вологість матеріалу, що сушиться в дійсній сушарці, яка працює за режимом з частковою рециркуляцією теплоносія, відповідно 55 % і 14 %, а його температура на вході і виході відповідно $\theta_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 52 \text{ }^\circ\text{C}$, стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70 \text{ \%}$; $t_2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 40 \text{ \%}$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,08$ становить $1,85 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо витрата вологого матеріалу 900 кг/год , а втрати в навколишнє середовище складають 11 %. Коефіцієнт рециркуляції 1,8.

Задача 5.7 Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо вона працює за замкненим циклом, з витратою вологого матеріалу 2500 кг/год . Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 50 % і 18 %, а його температура на вході і виході відповідно $\theta_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$, характеристики повітря навколишнього середовища і після сушіння: $t_0 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 72 \text{ \%}$; $t_2 = 53 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50 \text{ \%}$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,14$ становить $2,5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, втрати в навколишнє середовище складають 21 %. Рух матеріалу і повітря протиструминний.

Задача 5.8 Барабанна сушарка працює за нормальним режимом, з витратою вологого матеріалу 2500 кг/год . Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 9 % і 5 %. Стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70 \text{ \%}$; $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50 \text{ \%}$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,1$ становить $2,7 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Скласти тепловий баланс дійсної сушарки для прямо струминного режиму, якщо втрати в навколишнє середовище складають 13 %, а температура повітря на вході і виході відповідно $\theta_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 57 \text{ }^\circ\text{C}$.

6 СХЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ

Приклад 6.1 У сушарку вводиться суміш зі свіжого повітря з параметрами $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_0 = 0,5$ і відпрацьованого повітря з параметрами $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 0,8$ з масовим відношенням 1:3 (в перерахунку на сухе повітря). Знайти стан суміші перед калорифером і після підігріву її в калорифері до $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Визначимо масові частки свіжого і відпрацьованого повітря

$$g_1 = \frac{1}{1+3} = 0,25 \quad g_2 = \frac{3}{1+3} = 0,75.$$

За $h-d$ діаграмою визначаємо вологовміст і ентальпію свіжого і відпрацьованого повітря за заданих t і φ . За $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_0 = 0,5$:

$$d_0 = 0,01 \text{ кг/кг} \quad \text{і} \quad h_0 = 50 \text{ кДж/кг},$$

а за $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 0,8$:

$$d_2 = 0,069 \text{ кг/кг} \quad \text{і} \quad h_2 = 228 \text{ кДж/кг}.$$

Отже, вологовміст суміші, згідно з рівнянням масового балансу, становить

$$d_{\text{см}} = g_1 \cdot d_1 + g_2 \cdot d_2 = 0,25 \cdot 0,01 + 0,75 \cdot 0,069 = 0,0542 \text{ кг/кг},$$

а ентальпія, за рівнянням теплового балансу

$$h_{\text{см}} = g_1 h_1 + g_2 h_2 = 0,25 \cdot 50 \cdot 10^3 + 0,75 \cdot 228 \cdot 10^3 = 183,5 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}.$$

Далі знаходимо на діаграмі точку перетину ліній:

$$d_{\text{см}} = 0,0542 \text{ кг/кг} \quad \text{і} \quad h_{\text{см}} = 183,5 \text{ кДж/кг}.$$

Цій точці відповідають:

$$t_{\text{см}} = 45 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{і} \quad \varphi_{\text{см}} = 0,85.$$

Нагрівання суміші в калорифері не супроводжується зміною вологовмісту, тобто $d_{\text{см}} = \text{const}$.

Отже, точка перетину $d_{\text{см}} = 0,0542 \text{ кг/кг}$ з ізотермою $80 \text{ }^\circ\text{C}$ дасть нам стан суміші після калорифера. Цій точці відповідають: $h_{\text{см}} = 147 \text{ кДж/кг}$ і $\varphi_{\text{см}} = 0,018$.

Приклад 6.2 Паста барвника висушувалася в камерній сушарці з рециркуляцією повітря. Аналіз проб на вологість дав такі результати (табл. 6.1):

Таблиця 6.1 – Результати сушіння пасты барвника

Час від початку сушіння, год	0	2	2,5	4,4	5	6	8	10	12	14	16	18	20
Вологовміст матеріалу, % на суху речовину	104	84	79,1	63,9	53,9	43,9	32	21,9	14	8	5	3	1,5

Визначити швидкість сушіння в залежності від часу, за отриманими даними побудувати криву сушіння і знайти критичний вологовміст матеріалу.

Розв'язання

Складаємо таблицю 6.2.

Таблиця 6.2. – Результати розрахунку швидкості сушіння

Час від початку сушіння t , год	Швидкість сушіння $\frac{\Delta w'}{\Delta t}$ (рахуючи на суху речовину), % за годину	Час від початку сушіння t , год	Швидкість сушіння $\frac{\Delta w'}{\Delta t}$ (рахуючи на суху речовину), % за годину
2	$\frac{104 - 84}{2} = 10$	10	$\frac{32 - 21,9}{2} = 5,05$
2,5	$(84 - 79,1) \cdot 2 = 9,8$	12	$\frac{21,9 - 14}{2} = 3,95$
4	$\frac{(79,1 - 63,9) \cdot 2}{3} = 10,14$	14	$\frac{14 - 8}{2} = 3$
5	$63,9 - 53,9 = 10$	16	$\frac{8 - 5}{2} = 1,5$
6	$53,9 - 43,9 = 10$	18	$\frac{5 - 3}{2} = 1$
7	$\frac{43,9 - 32}{2} = 5,95$	20	$\frac{3 - 1,5}{2} = 0,75$

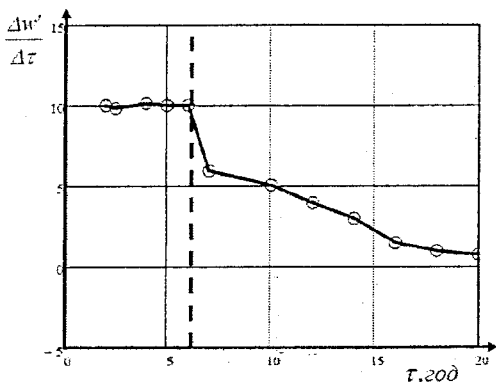


Рисунок 6.1 – Експериментальна крива сушіння

На підставі цієї таблиці будемо криву в координатах "швидкість сушіння – час сушіння" (рис. 6.1) і приходимо до висновку, що критичний вологовміст настає через 6 годин після початку сушіння. Йому відповідають 43,9% вологи (в перерахунку на абсолютно суху речовину) або $\frac{43,9 \cdot 100}{100 + 43,9} = 30,6\%$ вологи (в перерахунку на загальну масу продукту).

Приклад 6.3 Визначити витрату повітря і теплоти для висушування 1 тонни вологого матеріалу від $w_n = 50\%$ до $w_k = 6\%$ в теоретичній сушарці з рециркуляцією 80 % відпрацьованого повітря. Визначити потенціал сушки, якщо: $t_0 = 25^\circ\text{C}$, $d_0 = 0,0095$ кг/кг, $t_2 = 60^\circ\text{C}$, $d_2 = 0,041$ кг/кг.

Розв'язання

Визначаємо кількість вологи випаруваної в сушарці

$$W = G_n \cdot \frac{W_n - W_k}{100 - W_k} = 1000 \cdot \frac{50 - 6}{100 - 6} = 468 \text{ кг.}$$

Визначаємо вологовміст суміші

$$d_{\text{см}} = g_1 d_0 + g_2 d_2.$$

$$g_1 = \frac{100 - 80}{100} = 0,2 \text{ – свіже повітря.}$$

$$g_2 = \frac{80}{100} = 0,8 \text{ – рециркуляція}$$

$$d_{\text{см}} = 0,2 \cdot 0,0095 + 0,8 \cdot 0,041 = 0,035 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Визначаємо точку К на перетині АС і $d_{\text{см}}$.

$$\text{Знаходимо } h_{\text{см}} = 143 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

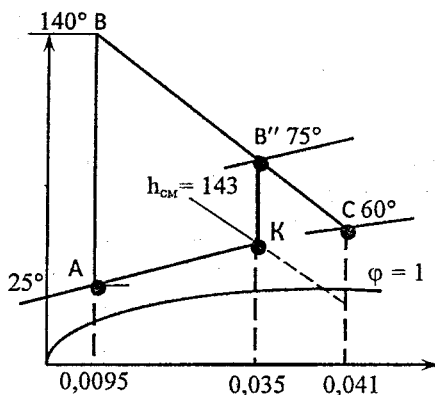


Рисунок 6.2 – Процес сушіння в сушарці з частковою рециркуляцією

Питома витрата сухого повітря

$$\ell' = \frac{1}{d_2 - d_{cm}} = \frac{1}{0,041 - 0,035} = 159 \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{вологи}}$$

Кількість повітря, що поступає в сушарку

$$L' = W \cdot \ell' = 468 \cdot 159 = 74500 \text{ кг.}$$

Кількість свіжого атмосферного повітря

$$L = 74500 \cdot 0,2 = 14900 \text{ кг.}$$

Питома витрата теплоти

$$q = \frac{h_2 - h_{cm}}{d_2 - d_{cm}} = \frac{167 - 143}{0,041 - 0,035} = 4000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{вологи}}$$

Витрата теплоти

$$Q = W \cdot q = 468 \cdot 4000 = 1872000 \text{ кДж.}$$

$$Q = \frac{1872000}{3600} = 520 \text{ кВт.}$$

Для розрахунку потенціалу сушіння з діаграми вологого повітря визна-

часомо t_1, t_2, t_m

$$t_1 = B'' = 75 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_2 = C = 60 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_m = 40 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\chi = \frac{(t_1 - t_m) - (t_2 - t_m)}{\ln \frac{(t_1 - t_m)}{(t_2 - t_m)}} = \frac{(75 - 40) - (60 - 40)}{\ln \frac{(75 - 40)}{(60 - 40)}} = 26,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Приклад 6.4 Визначити витрату повітря і теплоти для висушування 1 тонни вологого матеріалу від $w_n = 50\%$ до $w_k = 6\%$ (на загальну масу) в теоретичній сушарці, що працює з проміжним підігрівом, якщо повітря в калориферах підігрівається до $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити потенціал сушки $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_0 = 0,0095 \text{ кг/кг}$, $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_2 = 0,041 \text{ кг/кг}$.

Розв'язання

В h - d діаграмі будемо процес і знаходимо параметри точок
 точка А: $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_0 = 0,0095 \text{ кг/кг}$, $h_0 = 48 \text{ кДж/кг}$, $\varphi_0 = 52\%$;
 точка С: $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_2 = 0,041 \text{ кг/кг}$, $h_2 = 164 \text{ кДж/кг}$.

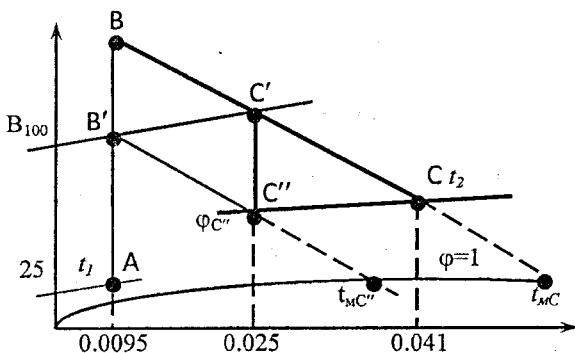


Рисунок 6.3 – Процес сушіння в сушарці з проміжним підігріванням

Визначаємо кількість випаруваної вологи

$$W = G_{\text{п}} \frac{w_n - w_k}{100 - w_k} = 1000 \cdot \frac{50 - 6}{100 - 6} = 468 \text{ кг}.$$

З діаграми визначаємо вологовміст, ентальпію проміжних точок і кіль-

кість калориферів. Точка C'' матиме параметри: $t_{C''} = 60$ °C, $d_{C''} = 0.025$ кг/кг, $\varphi_{C''} = 30\%$, $h_{C''} = 120$ кДж/кг, при цьому в першій зоні (камері) сушарки вологовміст підвищується до $0,025$ кг/кг.

Витрата сухого повітря

$$\ell' = \frac{1}{d_{C''} - d_0} = \frac{1}{0,025 - 0,0095} = 63,6 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

Оскільки камер дві, то в першій випаровується тільки половина вологи: $468:2=234$ кг, і годинна витрата повітря складе

$$L = \ell' \cdot \frac{W}{2} = 63,6 \cdot 234 = 14900 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

В другій камері сушарки проходить випаровування залишкової вологи, тим же повітрям, але підігрітим в проміжному калорифері. Тоді теплота на підігрів повітря в двох калориферах

$$\begin{aligned} Q &= \ell' \cdot \frac{W}{2} (h_{C''} - h_0) + \ell' \cdot \frac{W}{2} (h_2 - h_{C''}) = \\ &= \ell' \cdot \frac{W}{2} (h_{C''} - h_0 + h_2 - h_{C''}) - \ell' \cdot \frac{W}{2} (h_2 - h_0), \\ Q &= 63,6 \cdot \frac{468}{2} (167 - 46) = 1800000 \text{ кВт} \cdot \text{год} = \frac{180000}{3600} = 500 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Знайдемо потенціали сушіння по калориферах

$$\chi = (t_c - t_m) = \frac{(t_1 - t_m) - (t_2 - t_m)}{\ln \frac{(t_1 - t_m)}{(t_2 - t_m)}}$$

За діаграмою вологого повітря визначимо температури на вході і виході з сушарки і потенціали сушіння

Перший калорифер

$$t_1 = B' = 100 \text{ °C}; t_2 = C' = 60 \text{ °C}; t_{MC} = 35 \text{ °C}.$$

$$\chi = \frac{(100 - 35) - (60 - 35)}{\ln \frac{100 - 35}{60 - 35}} = 41,8 \text{ °C}.$$

Другий калорифер

$t_1 = C'' = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_2 = C = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{MC''} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

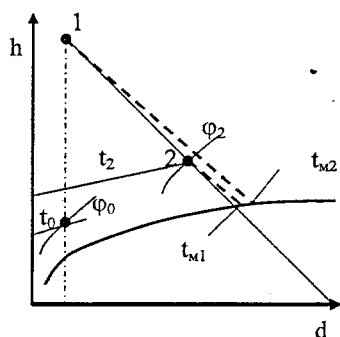
$$\chi = \frac{(100 - 40) - (60 - 40)}{\ln \frac{100 - 40}{60 - 40}} = 36,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Середнє значення потенціалу сушіння

$$\chi_{\text{ср}} = \frac{41,8 + 36,5}{2} = 39,15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Приклад 6.5 Знайти рушійну силу (середній температурний потенціал) сушильного процесу $\chi_{\text{ср}}$ для теоретичної сушарки за таких умов:

$t_0 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $\varphi_0 = 0,75$, $\varphi_2 = 0,45$.



Розв'язання

З h-d діаграми (рис. 6.4) знаходимо: $d_1 = 0,0125 \text{ кг/кг}$; $d_2 = 0,037 \text{ кг/кг}$;
 $d_{\text{нас}} = 0,043 \text{ кг/кг}$; $t_{M1} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $t_{M2} = 36,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Температурні потенціали на вході і виході з робочої камери

$$\Delta\chi_1 = t_1 - t_{M1}, \Delta\chi_2 = t_2 - t_{M2}.$$

Середній температурний потенціал

Рисунок 6.4 – Знаходження температурних потенціалів сушіння

$$\Delta\chi_{\text{ср}} = \frac{\Delta\chi_1 - \Delta\chi_2}{2,31g \frac{\Delta\chi_1}{\Delta\chi_2}} = \frac{(111 - 37,0) - (50 - 36,5)}{2,31g \frac{111 - 37,0}{50 - 36,5}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Приклад 6.6 Визначити витрату повітря та теплоти для висушування 1 тонни вологого матеріалу від $w_n = 50 \%$ до $w_k = 6 \%$ (на загальну масу) в теоретичній сушарці, що працює: а) за нормальним сушильним варіантом, б) з проміжним підігрівом (вважаючи, що повітря в калориферах підігрівається до $100 \text{ }^\circ\text{C}$), в) з поверненням 80% відпрацьованого повітря.

Порівняти також потенціали сушіння для цих варіантів.

Параметри атмосферного повітря: $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_0 = 0,0095 \text{ кг/кг}$.

Параметри відпрацьованого повітря: $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_2 = 0,041 \text{ кг/кг}$.

Розв'язання

Визначаємо кількість випарованої вологи

$$W = G_n \frac{w_n - w_k}{100 - w_k} = 1000 \cdot \frac{50 - 6}{100 - 6} = 468 \text{ кг/год.}$$

а) ведення процесу за нормальним сушильним варіантом.
Питома витрата сухого повітря

$$\ell = \frac{1}{d_2 - d_0} = \frac{1}{0,041 - 0,0095} = 31,8 \frac{\text{кг}}{\text{кг вологи}}.$$

Загальна витрата сухого повітря

$$L = \ell \cdot W = 31,8 \cdot 468 = 14\,900 \text{ кг/год.}$$

Питома витрата теплоти

$$q = \ell(h_2 - h_0) = 31,8(167 - 46) = 3860 \text{ кДж/кг вологи.}$$

Значення ентальпії знаходимо, користуючись h-d діаграмою вологого повітря.

Годинна витрата теплоти

$$Q = W \cdot q = \frac{487}{3600} \cdot 3860 = 502 \text{ кВт.}$$

б) за ведення процесу сушіння з проміжним підігрівом необхідні всього два калорифери для підігріву повітря до 100 °С. При цьому в першій зоні сушарки вологовміст повітря підвищується до 0,02525 кг/кг сухого повітря і питома витрата сухого повітря складає:

$$\ell' = \frac{1}{0,02525 - 0,0095} = 63,6 \frac{\text{кг}}{\text{кг вологи}}.$$

Оскільки в першій зоні сушарки випаровується лише половина всієї вологи, тобто 468 : 2 = 234 кг, то годинна витрата повітря

$$L = \ell' \frac{W}{2} = 63,6 \cdot 234 = 14\,900 \text{ кг/год.}$$

У другій зоні сушарки відбувається випаровування решти вологи тим

самим повітрям, але підігрітим в проміжному калорифері.

Теплота на підігрів повітря витрачається у двох калориферах, і витрата його дорівнює

$$Q = \ell'(p = h_2 - h_0) \frac{W}{2} + \ell'(h_2 - h_2') \frac{W}{2} = \frac{W}{2} \cdot \ell' \cdot (h_2 - h_0),$$

оскільки $\frac{\ell}{2} = \ell$, то

$$Q = W \cdot \ell \cdot (h_2 - h_0) = \frac{468}{3600} \cdot 31,8(167 - 46) = 500 \text{ кВт.}$$

в) для сушильного процесу з поверненням частини відпрацьованого повітря (80 %) визначаємо характеристики суміші, що надходить в калорифер

$$d_{см} = 0,2d_0 + 0,8d_2 = 0,2 \cdot 0,0095 + 0,8 \cdot 0,041 = 0,0347 \text{ кг/кг,}$$

$$h_{см} = 0,2h_1 + 0,8h_2 = 0,2 \cdot 46 + 0,8 \cdot 167 = 143 \text{ кДж/кг.}$$

Тоді питома витрата сухого повітря

$$\ell'' = \frac{1}{d_2 - d_{см}} = \frac{1}{0,041 - 0,0347} = 159 \frac{\text{кг}}{\text{кг вологи}},$$

а кількість повітря, що надходить в сушарку

$$L'' = W \cdot \ell'' = 468 \cdot 159 = 74\,500 \text{ кг/год.}$$

Кількість атмосферного повітря (20 %)

$$L = 74\,500 \cdot 0,2 = 14\,900 \text{ кг/год.}$$

Питома витрата теплоти

$$q = \frac{h_2 - h_{см}}{d_2 - d_{см}} = \frac{467 - 143}{0,041 - 0,0347} = 3820 \frac{\text{кДж}}{\text{кг вологи}}.$$

Витрата теплоти

$$Q = Wq = \frac{468}{3600} 3820 = 495 \text{ кВт.}$$

З порівняння витрати повітря і теплоти на сушіння за трьома розглянутими варіантами видно, що за одних і тих же початкових і кінцевих пара-

метрів повітря ці витрати однакові.

Порівняємо середні потенціали сушіння:

$$\text{а) } \chi_{\text{cp}} = \frac{(t_1 - t_m) - (t_2 - t_m)}{\ln \frac{t_1 - t_m}{t_2 - t_m}} = \frac{(140 - 40) - (60 - 40)}{\ln \frac{140 - 40}{60 - 40}} = 49,8 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\text{б) } \chi_{\text{cp}_1} = \frac{(100 - 35) - (60 - 35)}{\ln \frac{100 - 35}{60 - 35}} = 41,8 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\chi_{\text{cp}_2} = \frac{(100 - 40) - (60 - 40)}{\ln \frac{100 - 40}{60 - 40}} = 36,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\chi_{\text{cp}} = \frac{41,8 - 36,5}{2} = 39,15 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\text{в) } \chi_{\text{cp}} = \frac{(75 - 40) - (60 - 40)}{\ln \frac{75 - 40}{60 - 40}} = 26,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

З порівняння потенціалів сушіння видно, що найменше значення потенціалу (найбільш м'які умови сушіння) отримано у варіанті з поверненням частини відпрацьованого повітря, а найбільше – у нормальному сушильному варіанті (сушіння на однократному продуванні повітря через робочу камеру).

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Задача 6.1 Розпилювальна теоретична сушарка для сушіння молока працює з проміжним підігрівом повітря, причому повітря в калориферах прогрівається до $60 \text{ } ^\circ\text{C}$. Визначити потенціал сушіння, витрату повітря і теплоти для висушування 2 тонн молока від $w_n = 92 \%$ до $w_k = 8 \%$, якщо параметри вхідного і вихідного повітря відповідно: $t_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70 \%$; $t_2 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50 \%$.

Задача 6.2 Тунельна сушарка працює з проміжним підігрівом повітря, причому повітря в калориферах прогрівається до $70 \text{ } ^\circ\text{C}$. Визначити потенціал сушіння, витрату повітря і теплоти для висушування 5 тонн сировини від $w_n = 72 \%$ до $w_k = 24 \%$, якщо параметри вхідного і вихідного повітря відповідно: $t_0 = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70 \%$; $t_2 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 40 \%$. Процес вважати теоретичним.

Задача 6.3 Знайти годинну витрату атмосферного повітря і теплоти в сушарці з рециркуляцією частини відпрацьованого повітря за таких умов:

Характеристики повітря (рахуючи на сухе повітря)

- атмосферного $h_0 = 50$ кДж/кг; $\phi_0 = 0,7$;
- відпрацьованого $h_2 = 260$ кДж/кг; $\phi_2 = 0,8$;

Кількість повернутого повітря 80% (від повітря після сушарки);

Вологість матеріалу (рахуючи на загальну масу)

- початкова $w_n = 47$ %;
- кінцева $w_k = 5$ %;

Видатність сушарки (за вологим матеріалом) $G_n = 1,5$ т/год.

Задача 6.4 Знайти потрібну для протікання процесу сушіння кількість повітря і витрату теплоти в калорифері за таких умов:

Характеристики повітря (рахуючи на сухе повітря)

- атмосферного $d_0 = 0,01$ кг/кг, $t_0 = 20$ °С;
- відпрацьованого $d_2 = 0,028$ кг/кг, $t_2 = 34$ °С;

Кількість рециркуляту 80%

Вологість матеріалу (рахуючи на загальну масу)

- початкова $w_n = 50$ %;
- кінцева $w_k = 13$ %;

Видатність сушарки $G_n = 1$ т/год.

Втрати теплоти в навколишнє середовище $Q_{вт} = 15\%$ від загальної кількості теплоти.

Задача 6.5 Тунельна теоретична сушарка працює з рециркуляцією повітря, причому коефіцієнт рециркуляції 1,6. Визначити потенціал сушіння, витрату повітря і теплоти для висушування 5 тонн сировини від $w_n = 72$ % до $w_k = 24$ %, якщо параметри вхідного і вихідного повітря відповідно: $t_0 = 15$ °С; $\phi_0 = 70$ %; $t_2 = 50$ °С; $\phi_2 = 40$ %.

Задача 6.6 Повітря в калорифері камерної теоретичної сушарки прогрівається до 60 °С. Визначити потенціал сушіння, витрату повітря і теплоти для висушування 2 тонн сировини від $w_n = 45$ % до $w_k = 8$ %, якщо параметри вхідного і вихідного повітря відповідно: $t_0 = 15$ °С; $t_2 = 50$ °С; $\phi_2 = 40$ %, а сушарка працює за схемою із замкненою циркуляцією повітря.

Задача 6.7 Тунельна теоретична сушарка працює за схемою із замкненою циркуляцією повітря. Визначити потенціал сушіння, витрату повітря і теплоти для висушування 5 тонн сировини від $w_n = 72$ % до $w_k = 24$ %, якщо параметри вхідного і вихідного повітря відповідно: $t_0 = 15$ °С; $t_2 = 50$ °С; $\phi_2 = 40$ %.

Задача 6.8 Стрічкова теоретична сушарка для сушіння моркви працює з проміжним підігрівом повітря, причому повітря в калориферах прогрівається до 65 °С. Визначити витрату повітря і теплоти для висушування 500 кг/год моркви від $w_n = 82$ % до $w_k = 8$ %, якщо параметри вхідного і вихідного повітря відповідно: $t_0 = 12$ °С; $\phi_0 = 80$ %; $t_2 = 60$ °С; $\phi_2 = 50$ %. Визначити також потенціал сушіння.

Задача 6.9 Барабанна сушарка працює з проміжним підігрівом повітря,

причому повітря в калориферах прогрівається до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити потенціал сушіння, витрату повітря і теплоти для висушування 10 тонн сировини від $w_n = 72\%$ до $w_k = 14\%$, якщо параметри вхідного і вихідного повітря відповідно: $t_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_0 = 70\%$; $t_2 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_2 = 40\%$. Процес вважати теоретичним.

Задача 6.10 Стрічкова теоретична сушарка працює з рециркуляцією повітря, причому коефіцієнт рециркуляції 1,8. Визначити потенціал сушіння, витрату повітря і теплоти, якщо подача сировини становить 200 кг/год з початковою вологістю $w_n = 82\%$, параметри вхідного і вихідного повітря відповідно: $t_0 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_2 = 40\%$, а кінцева вологість продукту становить $w_k = 19\%$.

Задача 6.11 Сировина сушиться за таких параметрів повітря: $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_0 = 70\%$; $t_2 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_2 = 40\%$ в сушарках на продув і з частковою рециркуляцією ($n = 1,5$). Порівняйте потенціали сушіння, якщо потужність калорифера 300 кВт.

Задача 6.12 Порівняйте потенціали сушіння за різними режимами, якщо потужність калорифера сушарки 300 кВт. Сировина сушиться за таких параметрів повітря: $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_0 = 70\%$; $t_2 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_2 = 40\%$ в сушарках з проміжним підігрівом ($t_{\text{пром}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ і з частковою рециркуляцією ($n = 1,5$).

Задача 6.13 Сировина сушиться за таких параметрів повітря: $t_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_0 = 60\%$; $t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_2 = 40\%$ в сушарках на продув і з повною циркуляцією. Порівняйте потенціали сушіння, якщо потужність калорифера 300 кВт, а кількість випаруваної вологи 300 кг.

Задача 6.14 Сировина сушиться за таких параметрів повітря: $t_0 = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_0 = 70\%$; $t_2 = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_2 = 50\%$ в сушарках з проміжним підігрівом ($t_{\text{пром}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) і з повною циркуляцією. Порівняйте потенціали сушіння, якщо потужність калорифера 420 кВт, а кількість випаруваної вологи 400 кг.

Задача 6.15 Порівняйте потенціали сушіння, якщо потужність калорифера 100 кВт. Сировина сушиться за наступних параметрів повітря: $t_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_0 = 60\%$; $t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_2 = 40\%$ в сушарках з рециркуляцією ($n=1,9$) і з повною циркуляцією. Годинний вихід конденсату 200 кг/год.

Задача 6.16 Визначте і порівняйте потенціали сушіння, якщо сировина масою 2 тонни сушиться від вологості $w_n = 60\%$ до вологості $w_k = 10\%$ за таких параметрів повітря: $t_0 = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_0 = 50\%$; $t_2 = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_2 = 30\%$ в сушарках з проміжним підігрівом ($t_{\text{пром}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) і на продув. Потужність калорифера 250 кВт.

Задача 6.17 Сировина масою 3 тонни сушиться від вологості $w_n = 80\%$ до вологості $w_k = 14\%$ за таких параметрів повітря: $t_0 = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_0 = 50\%$; $t_2 = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_2 = 30\%$ в сушарках з рециркуляцією ($n=1,8$) і на продув. Потужність калорифера 250 кВт. Визначте і порівняйте потенціали сушіння.

Задача 6.18 Порівняйте потенціали сушіння, якщо сировина сушиться за таких параметрів повітря: $t_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_0 = 76\%$; $t_2 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_2 = 40\%$ в сушарках на продув і з частковою рециркуляцією ($n = 1,5$).

7 РОЗРАХУНКИ ДІЙСНИХ СУШАРОК

Приклад 7.1 Визначити витрату повітря, витрату і необхідний тиск гріючої пари, для безперервно діючої протиструминної сушарки, яка працює за нормальним сушильним варіантом.

Продуктивність сушарки за вологим матеріалом $G_n = 350$ кг/год.

Початкова вологість матеріалу $w_n = 42$ %.

Кінцева вологість матеріалу $w_k = 11$ %.

Температура матеріалу, який надходить на сушіння $\vartheta_1 = 18$ °С.

Температура матеріалу, що виходить з сушарки $\vartheta_2 = 47$ °С.

Характеристика стану повітря:

до калорифера $t_0 = 15$ °С; $\varphi_0 = 70$ %;

після сушарки $t_2 = 45$ °С; $\varphi_2 = 60$ %.

Теплоємність висушеного ($w_k = 11$ %) матеріалу $c_k = 2,35$ кДж/(кг·К).

Маса транспортуючого пристрою (сталевий транспортер)... $G_{тр} = 600$ кг.

Теплові втрати сушарки у навколишнє середовище від суми всіх інших складових теплового балансу $Q_{втр} = 12$ %.

Вологість гріючої пари 6%.

Розв'язання

Кількість випаруваної в сушарці вологи

$$W = G_n \frac{w_n - w_k}{100 - w_k} = 350 \frac{42 - 11}{100 - 11} = 122 \text{ кг/год.}$$

За h-d діаграмою знаходимо вологовміст і ентальпію повітря до калорифера і повітря, що виходить з сушарки

$$d_0 = 0,0077 \text{ кг/кг; } d_2 = 0,038 \text{ кг/кг;}$$

$$h_0 = 35 \text{ кДж/кг; } h_2 = 145 \text{ кДж/кг.}$$

Витрату сухого повітря в сушарці на випаровування вологи W, кг/год

$$L = \frac{W}{d_2 - d_0} = \frac{122}{0,0388 - 0,0077} = 4030 \text{ кг/год.}$$

Витрата теплоти в теоретичній сушарці

$$Q = L(h_2 - h_0) = \frac{4030(145 \cdot 10^3 - 35 \cdot 10^3)}{3600} = 123000 \text{ Вт.}$$

У дійсній сушарці теплота витрачається на підігрів матеріалу

$$G_k c_k (\vartheta_2 - \vartheta_1) = \frac{(350 - 122) 2,35 \cdot 10^3 (47 - 18)}{3600} = 4300 \text{ Вт,}$$

а також на нагрів транспортувальних пристроїв. В умовах нашого завдання ця кількість теплоти:

$$G_{\text{тп}} c_{\text{тп}} (\vartheta_2 - \vartheta_1) = \frac{60 \cdot 0,5 \cdot 10^3 (47 - 18)}{3600} = 2420 \text{ Вт,}$$

де $0,5 \cdot 10^3$ – теплоємність сталі, Дж/(кг·К).

Із загальної кількості теплоти, яку необхідно подати в сушарку, потрібно відняти кількість теплоти, що вноситься вологою, яка знаходиться у вологому матеріалі

$$W \cdot \vartheta_1 \cdot c_w = \frac{122 \cdot 18 \cdot 4,19 \cdot 10^3}{3600} = 2560 \text{ Вт.}$$

Тоді загальна кількість теплоти, яка повинна бути підведена в калорифер, з врахуванням втрат у навколишнє середовище, складе:

$$Q = (123\,000 + 4300 + 2420 - 2560) \cdot 1,12 = 142\,500 \text{ Вт.}$$

Порівнюючи витрати теплоти в теоретичній і дійсній сушарці, можна бачити, що в останній витрата теплоти вища лише на 15 %.

Оскільки

$$Q = L (h_1 - h_0) = 142\,500 \text{ Вт,}$$

то

$$h_1 - h_0 = \frac{Q}{L} = \frac{142500 \cdot 3600}{4030} = 127,5 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Отже

$$h_1 = 127,5 \cdot 10^3 + h_0 = 127,5 \cdot 10^3 + 35 \cdot 10^3 = 162 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Цьому значенню h_1 відповідає температура повітря після калорифера $t_1 \approx 138 \text{ }^\circ\text{C}$ (за h - d діаграмою). Приймасмо на виході повітря з калорифера

$$\Delta t = t_{\text{тпн}} - t = 10 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Тоді

$$t_{\text{гр.п}} = 138 + 10 = 148 \text{ }^\circ\text{C},$$

чому відповідає необхідний тиск гріючої пари, $P_{\text{абс}} \approx 470 \text{ кПа}$ (додаток В).

Витрата гріючої пари:

$$D = \frac{Q}{r_{\text{x}'}} = \frac{142500}{2124 \cdot 10^3 \cdot 0,94} = 0,0715 \text{ кг/с} = 257 \text{ кг/год},$$

де x' – паровміст;

r – теплота конденсації пари при $148 \text{ }^\circ\text{C}$;

Питома витрата пари:

$$d_{\text{п}} = \frac{D}{W} = \frac{257}{122} = 2,1 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Приклад 7.2 Визначити середній коефіцієнт теплопередачі (від пари до матеріалу) у дослідного елемента парової трубчастої сушарки для торфу за таких умов.

Продуктивність елемента сушарки (в перерахунку на

абсолютно сухий торф) $G = 11,2 \text{ кг/год}$.

Початкова вологість торфу (в перерахунку на суху речовину) $u'_n = 0,57 \text{ кг/кг}$.

Кінцева вологість торфу $u'_k = 0,148 \text{ кг/кг}$.

Температура торфу, що надходить на сушіння $\vartheta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Температура торфу, що виходить з сушарки $\vartheta_2 = 52 \text{ }^\circ\text{C}$.

Теплоємність абсолютно сухого торфу $c = 1,26 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$.

Характеристика стану повітря

до калорифера $t_0 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 0,34$;

після калорифера $t_2 = 82 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 0,37$.

Барометричний тиск $P = 773 \text{ мм рт. ст.}$

Температура пари $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Поверхня нагрівання труби $F = 2,18 \text{ м}^2$.

Розв'язання

Середній коефіцієнт теплопередачі визначається з виразу

$$k = \frac{Q}{F \Delta t_{\text{сп}}}$$

де Q – кількість теплоти, що проходить через поверхню нагрівання, Вт;

Δt_{cp} – середня різниця температур, К.

Кількість теплоти, що передається через ґрунчу поверхню

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

де Q_1 – кількість теплоти на випаровування вологи і нагрівання повітря;

$$Q_1 = W \frac{h_2 - h_0}{d_2 - d_0};$$

Q_2 – кількість теплоти на нагрівання торфу;

Q_3 – втрати теплоти в навколишнє середовище.

Кількість випарованої вологи

$$W = \frac{11,2(0,57 - 0,128)}{3600} = 0,0013 \text{ кг/сек.}$$

Початковий і кінцевий вологовміст повітря, відповідно

$$d_0 = 0,622 \frac{0,34 \cdot 0,0270}{1,017 - 0,34 \cdot 0,027} = 0,0057 \text{ кг/кг,}$$

$$d_2 = 0,622 \frac{0,37 \cdot 0,5233}{1,017 - 0,37 \cdot 0,5233} = 0,146 \text{ кг/кг.}$$

Ентальпія повітря до надходження в сушарку

$$h_0 = (1,01 \cdot 10^3 + 1,97 \cdot 10^3 \cdot 0,0057) \cdot 22 + 2493 \cdot 10^3 \cdot 0,0057 = 36,5 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг,}$$

а на виході з сушарки

$$h_2 = (1,01 \cdot 10^3 + 1,97 \cdot 10^3 \cdot 0,146) \cdot 82 + 2493 \cdot 10^3 \cdot 0,146 = 470 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг.}$$

Тоді

$$Q_1 = 0,0013 \cdot \frac{470 \cdot 10^3 - 36,5 \cdot 10^3}{0,146 - 0,0057} = 4050 \text{ Вт,}$$

$$Q_2 = G_{\text{т}}(h_2 - h_0),$$

де h_2 та h_0 – питома ентальпія торфу, що виходить і входить в сушарку

$$h_2 = (1,26 \cdot 10^3 \cdot 1 + 4,19 \cdot 10^3 \cdot 0,148) \cdot 52 = 97,8 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг,}$$

$$h_0 = (1,26 \cdot 10^3 \cdot 1 + 4,19 \cdot 10^3 \cdot 0,57) \cdot 20 = 73 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг.}$$

Отже

$$Q_2 = \frac{11,2}{3600} (97,8 \cdot 10^3 - 73 \cdot 10^3) = 77 \text{ Вт.}$$

Втрати теплоти в навколишнє середовище Q_3 можна прийняти рівними 10% від Q_1 . Тоді загальна кількість теплоти

$$Q = 4050 + 77 + 405 = 4532 \text{ Вт.}$$

Середня різниця температур в сушарці

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{(100 - 20) + (100 - 52)}{2} = 64 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Коефіцієнт теплопередачі

$$k = \frac{Q}{F \Delta t_{\text{cp}}} = \frac{4532}{2,18 \cdot 64} = 32,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Приклад 7.3 Визначити час сушіння зерен гречки (частинки гострої форми) у повітряній пневматичній сушарці і необхідну довжину сушарки за таких умов: продуктивність $G_x = 250$ кг/год висушеного продукту, еквівалентний діаметр частинок $d_e = 1$ мм, густина матеріалу $\rho_{\text{мат}} = 1480$ кг/м³.

Характеристики стану повітря

До калорифера $t_0 = 15$ °С, $\varphi_0 = 0,7$.

Після калорифера $t_1 = 90$ °С.

На виході з сушарки $t_2 = 50$ °С.

Температура зерен на вході $\vartheta_1 = 15$ °С.

Температура зерен на виході $\vartheta_2 = 40$ °С.

Теплоємність сухих кристалів $c_k = 1,16$ кДж/(кг·К).

Вологість кристалів (на абсолютно суху речовину)

початкова $w'_n = 15\%$;

кінцева $w'_k = 1\%$.

Розв'язання

Час сушіння можна визначити з рівняння тепловіддачі:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t.$$

Тоді

$$\tau = \frac{Q}{\alpha F \Delta t}.$$

Для визначення витрати повітря і теплоти на сушіння, робимо побудову ходу сушильного процесу в $h-d$ діаграмі (додаток А), попередньо розрахувавши кількість вологи W , що видаляється при сушінні, і теплові втрати Δ

$$W = G_{\text{сух}} \frac{w'_n - w'_k}{100} = 250 \cdot 0,99(0,15 - 0,01) = 34,6 \text{ кг/год},$$

$$\Delta = q_{\text{мат}} + q_{\text{пот}} - c_p \vartheta_1,$$

$$q_{\text{мат}} = \frac{G_k c_k (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{W} = \frac{250 \cdot 1,16 \cdot 10^3 (40 - 15)}{34,6} = 209,5 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг вологи}}.$$

Прийнемо теплові втрати рівними 10% від витрати теплоти на нагрівання матеріалу і повітря, і на випаровування вологи:

$$\begin{aligned} q_{\text{втр}} &= 0,1 q_{\Sigma} = 0,1 (2493 \cdot 10^3 + 1,97 \cdot 10^3 \cdot t_2 + q_{\text{мат}} - 4,19 \cdot 10^3 \vartheta_1) = \\ &= 0,1 (2493 \cdot 10^3 + 1,97 \cdot 10^3 \cdot 5 + 209,5 \cdot 10^3 - 4,19 \cdot 10^3 \cdot 15) = 274 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

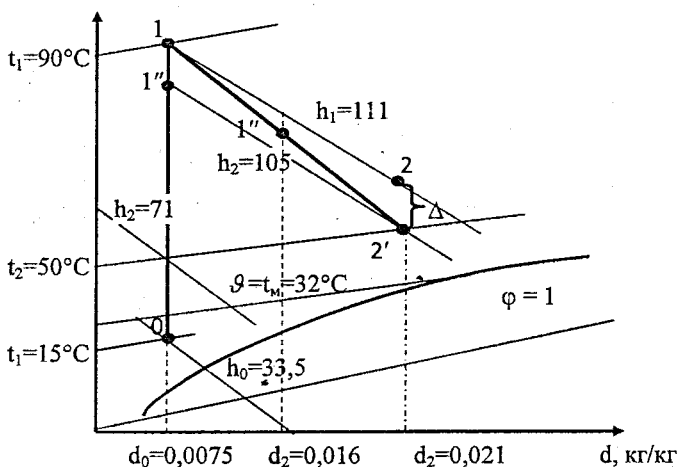


Рисунок 7.1 – Побудова процесу сушіння в $h-d$ діаграмі

Тоді:

$$\Delta = 209,5 \cdot 10^3 + 274 \cdot 10^3 - 4,19 \cdot 10^3 \cdot 15 = 420,2 \text{ кДж/кг}.$$

Для визначення положення точки 2' (1-2' відповідає дійсному сушильному процесу, 1-2 – теоретичному) діємо таким чином (рис. 7.1). Відклада-

емо від лінії теоретичного процесу 1-2 знайдене значення Δ , за сталим вологовмістом d_2 .

При цьому має виконуватись рівність

$$\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h} = \frac{d_2 - d_0}{d - d_0},$$

де d і h – координати точки 2'.

Звідки

$$h_1 - h = \frac{h_1 - h_2}{d_2 - d_0} (d - d_0),$$

але

$$\frac{h_1 - h_2}{d_2 - d_0} = \ell (h_1 - h) = \Delta.$$

Тоді

$$h_1 - h = \Delta (d - d_0).$$

Для визначення положення точки 2', через яку повинна пройти пряма 1-2', задасмо деяким значенням d , наприклад $d = 0,016$ кг/кг. Оскільки d_0 і h_1 відомі з початкових умов, а Δ визначено, то для даного значення d можна знайти відповідне значення h :

$$h = h_1 - \Delta (d - d_0) = 111,0 \cdot 10^3 - 420,2 \cdot 10^3 \cdot (0,016 - 0,0075) = 107 \text{ кДж/кг}.$$

Провівши через точки 1 і 1' пряму до перетину з ізотермою $t_2 = 50^\circ \text{C}$, отримуємо точку 2', відповідну стану повітря на виході з сушарки. Для точки 2' знаходимо $d_2 = 0,021$ кг/кг, $h_2 = 105$ кДж/кг.

$$h = h_1 - \Delta (d - d_0) = 111,0 \cdot 10^3 - 420,2 \cdot 10^3 (0,016 - 0,0075) = 170 \text{ кДж/кг}.$$

Годинна витрата повітря (сухого) на сушіння

$$L = \frac{W}{d_2 - d_0} = \frac{34,6}{0,021 - 0,0075} = 2560 \text{ кг/год}.$$

Витрата теплоти в сушарці (кількість теплоти, переданої в повітря від калориферів)

$$Q = L(h_1 - h_0) = \frac{2560(111,0 \cdot 10^3 - 33,5 \cdot 10^3)}{3600} = 55200 \text{ Вт}.$$

Коефіцієнт теплопроводу від гарячого повітря до частинок матеріалу, що сушаться в умовах труби-сушарки, може бути наближено знайдений з рис. 7.2, на якому подана залежність $Nu = f(Gr)$, побудована за даними Федорова [9].

Критерій Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha d_c}{\lambda},$$

де d_c – діаметр частинки, що дорівнює 10^{-3} м;

$\lambda = 0,0285$ Вт/(м·К) – коефіцієнт теплопроводності повітря.

Критерій Архімеда

$$Gr = \frac{d_c^3 (\rho_{\text{мат}} - \rho_c) g}{\nu^2 \rho_c},$$

де $\rho_{\text{мат}} = 1480$ кг/м³ – густина матеріалу;

$\rho_c = 1,03$ кг/м³ – густина повітря за середньої температури

$$t_{\text{ср}} = \frac{90 + 50}{2} = 70 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$\nu = 2 \cdot 10^{-3}$ м²/с – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря за 70 °С.

Підставляючи ці значення, отримуємо

$$Gr = \frac{10^{-9} (1480 - 1,03) \cdot 9,81}{2^2 \cdot 10^{-10} \cdot 1,03} = 3,52 \cdot 10^4.$$

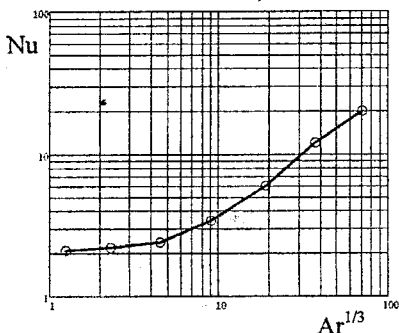


Рисунок 7.2 – Залежність критерію Нуссельта від критерію Архімеда для умов вільного витання частинок

Тоді

$$Gr^{1/3} = 32,8 \text{ та } Nu = 10,$$

звідки

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d_e} = 10 \frac{0,0285}{0,001} = 285 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Зовнішня поверхня частинок

$$F = \pi d_e^2.$$

Число частинок, що проходять через сушарку за 1 годину

$$n = \frac{G}{\frac{\pi d_e^3}{6} \rho_{\text{мат}}}.$$

Середню різницю температур наближено (не враховуючи підігріву, початкову температуру матеріалу можна прийняти рівною температурі мокрого термометра, тобто 32 °С) визначасмо таким чином

$$\begin{array}{ccc} 90 & \xrightarrow{\text{повітря}} & 50 \\ 32 & \xrightarrow{\text{матеріал}} & 40 \\ \Delta t_1 = 58 & & \Delta t_2 = 10 \end{array}$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{50 - 10}{\ln\left(\frac{58}{10}\right)} = 27,3 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Кількість теплоти Q' , що віддається гарячим повітрям матеріалу, що сушиться

$$\begin{aligned} Q' &= Q - Q_{\text{пст}} - L(h_2' - h_0) = \\ &= 55200 - \frac{274 \cdot 10^3 \cdot 34,6 - 2560(71 \cdot 10^3 - 33,5 \cdot 10^3)}{3600} = 25800, \end{aligned}$$

де $h_2' = 71 \cdot 10^3$ Дж/кг – ентальпія повітря за $d_0 = 0,0075$ кг/кг і $t_2 = 50$ °С.
Тоді час сушіння

$$\tau = \frac{Q'}{\alpha F \Delta t_{cp}} = \frac{25800}{285 \cdot 0,281 \cdot 27,3} = 11,85 \text{ с.}$$

Довжина сушарки може бути знайдена з такої рівності

$$\tau = \frac{\ell}{\omega - \omega_{oc}},$$

де ℓ – довжина труби, м;

ω – швидкість повітря в сушарці, м/сек;

ω_{oc} – швидкість осадження, м/сек.

Швидкість осадження знаходимо з рис. 7.3, на якому подана залежність критерію Лященко від критерію Архімеда $Ly = f(Ar)$ для частинок гострої форми.

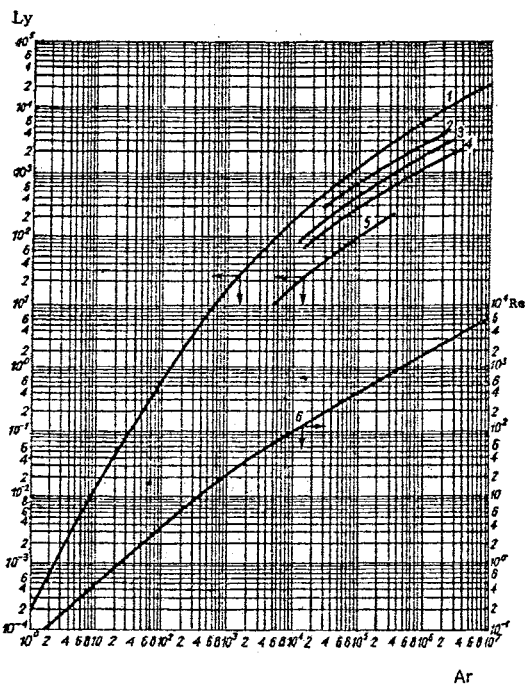


Рисунок 7.3 – Залежність критеріїв Рейнольдса і Лященко від критерію Архімеда для осадження частинок в нерухомому середовищі

Для $Ar = 3,52 \cdot 10^4$ $Ly = 205$. При цьому

$$\omega_{oc} = \sqrt[3]{\frac{Ly \cdot v_c (\rho_{мет} - \rho_c) g}{\rho_c}} = \sqrt[3]{\frac{205 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 1,48 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{1,03}} = 3,86 \text{ м/сек.}$$

Найчастіше приймають $\omega = (1,1 \div 1,25) \omega_{oc}$.

Прийемо $\omega = 3,86 \cdot 1,2 = 4,64 \text{ м/сек.}$

Тоді

$$\ell = \tau (\omega - \omega_{oc}) = 11,85 (4,64 - 3,86) = 9,25 \text{ м.}$$

Насправді час перебування частинок в трубі-сушарці більший, ніж виходить з розрахунку, оскільки не враховується час розгону частинок, після якого встановлюється режим руху. Це підтверджується експериментальними даними.

Додаткова довжина труби для частинок розміром 0,2 – 1 мм може бути визначена з емпіричної залежності отриманої при обробці експериментальних даних Федорова для швидкості повітря від 15 до 50 м/сек

$$\ell_p = \omega d,$$

де ω – швидкість повітря, м/сек;

d – діаметр частинки, мм.

У нашому прикладі $\ell_p = 4,64 \cdot 1 = 4,64 \text{ м.}$

Тоді загальна довжина труби-сушарки:

$$L = 9,25 + 4,64 = 13,89 \text{ м.}$$

Діаметр сушарки визначається з рівняння витрати:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785\omega}},$$

$$V \approx \frac{2560}{1,03 \cdot 3600} = 0,69 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Тоді:

$$D = \sqrt{\frac{0,69}{0,785 \cdot 4,65}} = 0,224 \text{ м.}$$

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Задача 7.1 Знайти витрату повітря, витрату гріючої пари і її тиск для протиструминної теоретичної сушарки, що працює за нормальним сушильним варіантом. Продуктивність сушарки 600 кг/год за вологим матеріалом, початкова вологість якого 50 %, а кінцева 9 %. Повітря, яке надходить в калорифер, має $t_0 = 10^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 80\%$; повітря після сушарки, має $t_2 = 50^\circ\text{C}$, та $\varphi_2 = 50\%$. Вологість гріючої пари 6 %.

Розрахунок провести: а) для теоретичної сушарки, б) для реальної сушарки, приймаючи в ній температуру матеріалу на вході 16°C , на виході 55°C . Теплоємність висушеного матеріалу $1,68\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$. Маса транспортного пристрою (стальний транспортер), який несе годинне завантаження вологого матеріалу, 450 кг. Втрати теплоти в навколишнє середовище 10 % від кількості теплоти, яке передається повітрю в калорифері.

Задача 7.2 В теоретичну сушарку, що працює з проміжним підігрівом повітря, надходить 1800 кг/год вологого матеріалу із $w_n = 39\%$ та $w_x = 8\%$ (на загальну масу). Повітря в сушильному апараті має температуру 45°C . Температура атмосферного повітря 20°C . Всього в сушильному апараті три калорифери, в кожному повітря нагрівається до 70°C . Після кожного калорифера повітря в сушарці насичується водяною паром до $\varphi = 0,7$. Знайти витрату сухого повітря з вологістю 5 % і гріючої пари, якщо її тиск $P_{\text{абс}} = 300\text{ кПа}$. Подати схему процесу на h-d діаграмі.

Задача 7.3 Витрата пари в калорифері сушарки з тиском $P_{\text{нал}} = 200\text{ кПа}$ і мірою сухості 0,9 складає 200 кг/год. Втрати теплоти в калорифері рівні 10 % від витрат теплоти в теоретичній сушарці, поверхня нагріву калорифера 41 м^2 . Атмосферне повітря має $t_p = 10^\circ\text{C}$ та $t_0 = 25^\circ\text{C}$. Процес сушіння проходить при $h_2 = 100\text{ кДж}/\text{кг}$. Парціальний тиск водяної пари в повітрі після сушарки 25 мм рт. ст. Знайти коефіцієнт теплопередачі в калорифері та продуктивність сушарки за вологим матеріалом, якщо матеріал, що потрапляє в сушарку, має вологість 60 %, а після сушарки 10 % (на загальну масу).

Задача 7.4 Видатність сушарки 500 кг/год (за сухим матеріалом), висушується матеріал від 70 до 10%. Покази психрометра атмосферного повітря 15 і 20°C . Із сушарки повітря виходить з температурою 45°C і відносною вологістю 50%. Втрата теплоти складають 8% від витрати теплоти в теоретичній сушарці. Знайти поверхню нагріву калорифера, якщо гріюча пара має тиск $P_{\text{абс}} = 200\text{ кПа}$ і вологість 5 %. Коефіцієнт теплопередачі калорифера $34,8\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$.

Задача 7.5 1000 кг/год вологого матеріалу з початковою вологістю 50 % висушується до кінцевої вологості 8 %. Сушіння виконується: а) в вакуум-сушарці з температурою матеріалу під час сушіння 40°C ; б) в атмосферній повітряній сушарці при ті й же температурі матеріалу (в першому періоді). Атмосферне повітря має $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 0,7$; після сушарки повітря

має $t_2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$. В обох випадках вологий матеріал потрапляє в сушарку з температурою $15 \text{ }^\circ\text{C}$, а виходить при $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплоємність сухого тіла в сухому матеріалі $1,26 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$. Втратами теплоти в навколишнє середовище знехтувати. Знайти питому витрату теплоти в обох сушарках.

Задача 7.6 В теоретичні сушарці продуктивністю 600 кг/год за абсолютно сухим матеріалом висушується матеріал від вологості 35% до 8% . Покази психрометра, який встановлений в приміщенні і на який потрапляє повітря із калорифера такі: $t_0 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Повітря після сушарки має $t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ та $\varphi = 0,65$. Знайти витрату гріючої пари на калорифер і його поверхню нагрівання, якщо тиск пари $P_{\text{абс}} = 200 \text{ кПа}$ та $k = 32,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$. Втрати теплоти калорифером складають 15% від теплоти, яка використовується в сушарці.

Задача 7.7 Знайти витрату повітря, витрату гріючої пари, її тиск й поверхню нагрівання калорифера для сушарки [$k = 34,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$], продуктивність якої 600 кг/год за вологим матеріалом з початковою вологістю 50% та кінцевою 9% . Покази психрометра для повітря, яке поступає в калорифер, $t_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Повітря після сушарки має: $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 50 \%$. Температуру гріючої пари прийняти на $15 \text{ }^\circ\text{C}$ вищою, ніж температура повітря після калорифера. Вологість гріючої пари 6% . Втрати становлять 10% від теплоти, затраченої на сушіння.

8 РОЗРАХУНКИ КОНВЕКТИВНИХ СУШАРОК

8.1 Камерні конвективні сушарки

8.1.1 Характеристики сушильних агентів

При використанні димових газів визначають масу сухого повітря Z_0 , необхідного для повного згорання 1 кг палива [6,8].

Масу сухих газів для рідких (твердих) і газоподібних палив обчислюють відповідно за формулами, кг/кг

$$G_{св} = 1 - 0,01(H^P + W^P + A^P), \quad (8.1)$$

$$G_{сг} = 1 - \sum [0,09n C_m H_n / (12m + n)] / 100. \quad (8.2)$$

Маса водяної пари в продуктах згорання, кг/кг

$$G_{пр} = 0,01(9H^P + W^P), \quad (8.3)$$

$$G_{пр} = \sum [0,09n C_m H_n / (12m + n)] / 100. \quad (8.4)$$

Загальний коефіцієнт надлишку повітря, необхідний для отримання суміші з певною температурою t_r , дорівнює

$$\alpha = (Q^P_v \cdot \eta_t + C_p t_n - G_{сг} C_{сг} t_r - G_{пр} h_n) / (Z_0 h_{пв}), \quad (8.5)$$

де Q^P_v – вища теплота згорання палива, кДж/кг;

$h_{пв} = C_r t_r + h_n d_0 - C_{пв} t_0$; C_r – теплоємність газів при температурі t_r ;

$h_n = 2500 + 1,87 t_r$; $d_0 = 10$ г/кг – вологовміст повітря в приміщенні;

$C_{пв}$ – теплоємність повітря при $t_{пв} = 20$ °С;

$\eta_t = 0,95$ – ККД топки.

Маса сухих газів і водяної пари у суміші, кг/кг

$$G_r = 1 + \alpha \cdot Z_0 - G_{пр}, \quad (8.6)$$

$$G_n = G_{пр} + \alpha \cdot Z_0 \cdot d / 1000. \quad (8.7)$$

Вологовміст суміші на вході в сушарку, г/кг

$$d_1 = G_n / G_r. \quad (8.8)$$

Ентальпія суміші на вході в сушарку, кДж/кг

$$h'_{см} = (Q^P_v \cdot \eta_t + C_p \cdot t_n + \alpha \cdot Z_0 \cdot C_{пв} \cdot t_0) / G_r. \quad (8.9)$$

Фізичні властивості окремих компонентів, які входять до складу суміші визначають з відповідних таблиць [2]. Нижче записані формули для визначення фізичних властивостей вологих сумішей.

Густина вологої суміші, кг/м³

$$\rho_{см} = 273/T \cdot \rho_{сг} (1 + d)(1 + d \cdot M_r/M_n), \quad (8.10)$$

де $\rho_{сг}$ – густина сухого газу за нормальної температури;

d – вологовміст суміші;

M_r і M_n – молекулярні маси газу і пари.

Коефіцієнт динамічної в'язкості, Па/с

$$\mu_{см} = [x/\mu_n + (1-x)/\mu_{сг}]^{-1}, \quad (8.11)$$

де $x = d(1+d)$; μ_n , $\mu_{сг}$ – в'язкість пари і сухого газу, відповідно.

Теплоємність суміші, кДж/(кг·К)

$$C_{см} = C_n \cdot x + C_{сг} \cdot (1-x), \quad (8.12)$$

де C_n , $C_{сг}$ – теплоємність пари і сухого газу.

Коефіцієнт теплопровідності суміші, Вт/(м·К)

$$\lambda_{см} = a \cdot C_{см} \cdot \mu_{см} \cdot 10^3/k, \quad (8.13)$$

де a – коефіцієнт, який залежить від атомності газів ($a = 2,5$ для одноатомних, $a = 1,9$ для двоатомних, $a = 1,72$ для триатомних газів);

k – коефіцієнт Пуассона.

8.1.2 Характеристики висушуваного матеріалу

При сушінні дисперсних матеріалів використовують еквівалентний діаметр частинок, який дорівнює, м

$$d_q = (6 \cdot V_q / 3,14)^{1/3} = 1,24 \cdot V_q^{1/3}, \quad (8.14)$$

де V_q – середній об'єм фракції, м³

Фактор форми частинок

$$f = F_q / F_{сф}, \quad (8.15)$$

де F_q і $F_{сф}$ – поверхня частинок і поверхня сфери при еквівалентному діаметрі, відповідно.

Фактор обтікання (динамічний коефіцієнт форми), який враховує режим обтікання частинки матеріалу газовим потоком

$$\Phi = 1/[0,843 \lg(15,38/f)] \text{ за } Re < 0,2, \quad (8.16)$$

$$\Phi = f^{0,9} Re^m \text{ за } 0,2 < Re < 2 \cdot 10^3, \quad (8.17)$$

$$\Phi = 1 + 11,6(f^{0,5} - 1) \text{ за } Re > 2 \cdot 10^3. \quad (8.18)$$

У формулі (8.17) $m = 0,15(f - 1)^{0,5}$.

При розпилюванні рідких матеріалів форсунками орієнтовний середній діаметр крапель може бути визначений за формулою, м

$$d_e = 5 \cdot b \cdot g \cdot \sigma / (\rho_{cm} \cdot W_{cm}^2), \quad (8.19)$$

де b – коефіцієнт, який залежить від властивостей рідини ($b = 2,5$ для води, $b = 3,5$ для спирту, $b = 5$ для гліцерину);

g – прискорення сил тяжіння;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м.

Критерій Федорова

$$Fe = d_e [4g(\rho_{m1} - \rho_{m2}) / (3v_{cm}^2 \cdot \rho_{cm})]^{1/2}, \quad (8.20)$$

де ρ_{m1} , ρ_{m2} – густина матеріалу на вході в сушарку і на виході з неї, відповідно;

v_{cm} – кінематична в'язкість сушильного агента.

Критерій Архімеда

$$Ar = \rho^* \cdot g \cdot d_e / \nu_{cm}^2, \quad (8.21)$$

де $\rho^* = (\rho_m - \rho_{cm}) / \rho_{cm}$.

8.1.3 Матеріальний і тепловий баланси сушарок

При розрахунках сушарок часто використовують поняття вологості на загальну масу вологого матеріалу, %

$$w = 100W / G_{m1} = 100W / (G_{m2} + W), \quad (8.22)$$

де W – вміст води в матеріалі, кг;

G_{m1} , G_{m2} – маси вологого і сухого матеріалу, відповідно, кг.

Вологість матеріалу зручно виражати на суху масу, тобто

$$w' = W / G_{m2} = w / (100 - w). \quad (8.23)$$

Беручи до уваги, що маси сухого матеріалу і сушильного агента незмінні, кількість випаруваної вологи буде дорівнювати

$$W = G_1 - G_2 = G_{cm}(d_2 - d_1)/1000, \quad (8.24)$$

де $G_1 = Gm_2(1 + w'_1)$; $G_2 = Gm_2(1 + w'_2)$;

w'_1, w'_2 – початкова і кінцева вологість на суху масу, відповідно;

d_1, d_2 – вологовміст сушильного агента до і після сушильної камери, відповідно.

Витрата сушильного агента на 1 кг випаруваної вологи, кг/кг

$$\ell = G_{cm}/W = 1000(d_2 - d_1). \quad (8.25)$$

Для дійсної сушарки з однократним використанням сушильного агента внутрішній тепловий баланс має вигляд

$$\Delta = \ell(h_2 - h_1) = q_0 + C_b t_{m1} - (q_m + q_{зв} + q_5), \quad (8.26)$$

де $q_m = G_m(C_m + C_b w'_2) \cdot (t_{m2} - t_{m1})/W$ – питома витрата теплоти на нагрів матеріалу;

q_0 – додаткова питома теплота, яка вводиться в сушильну камеру;

$q_5 = kF \cdot \Delta t/W$ – питомі втрати теплоти в навколишнє середовище;

C_m, C_b – теплоємність матеріалу і води;

t_{m1}, t_{m2} – температура матеріалу на вході в сушарку і на виході з неї;

k – коефіцієнт теплопередачі через огорожувальні поверхні сушильної камери;

F – зовнішня поверхня сушарки;

Δt – відповідний температурний напір.

При розрахунках сушарок величину q_5 в залежності від їх типу можна орієнтовно приймати в межах 20...300 кДж/кг. Питомі втрати теплоти на видалення зв'язаної вологи обчислюються за формулами

$$q_{зв} = a_3(w_1 - w_2)/2 \text{ за } w_1 < w_{кр}, \quad (8.27)$$

$$q_{зв} = a_3(w_{кр} - w_2)^2 / [2(w_1 - w_2)] \text{ за } w_1 > w_{кр}, \quad (8.28)$$

де $w_{кр}$ – критична вологість матеріалу;

a_3 – коефіцієнт функції $q_{зв} = f(w)$, який можна прийняти рівним 4187 кДж/кг.

За визначеним значенням поправки Δ на h - d діаграмі будується робочий процес у сушильній камері. Спочатку знаходять точку 1 на перетині ліній $d_1 = d_0$ і ізотерми t_1 . В точці 1 визначають ентальпію сушильного агента на вході в сушарку h_1 .

Далі з довільної точки C на ізентальпії $h_1 = \text{const}$ (рис.1.1) відкладають вниз при $\Delta < 0$ або вверх при $\Delta > 0$ відрізок CD, який дорівнює

$$CD = \Delta \cdot BC \cdot M_a / (1000 \cdot M_h),$$

де M_a і M_h – масштаби вологовмісту і ентальпії даної діаграми.

З точки 1 через точку D проводять лінію 1–2 (політропу) до перетину з визначеною ізотермою t_2 або вологовмістом d_2 .

З h-d діаграми визначають необхідні параметри сушильного агента на виході з сушарки h_2, t_2 або h_2, d_2 .

Питома витрата теплоти на випаровування 1 кг висушуваного матеріалу, кДж/кг :

$$q = \ell \cdot (h_1 - h_0). \quad (8.29)$$

Питома витрата сушильного агента на випаровування 1 кг висушуваного матеріалу, кг/кг

$$g_{\text{см}} = (w_1 - w_2) / (d_2 - d_1). \quad (8.30)$$

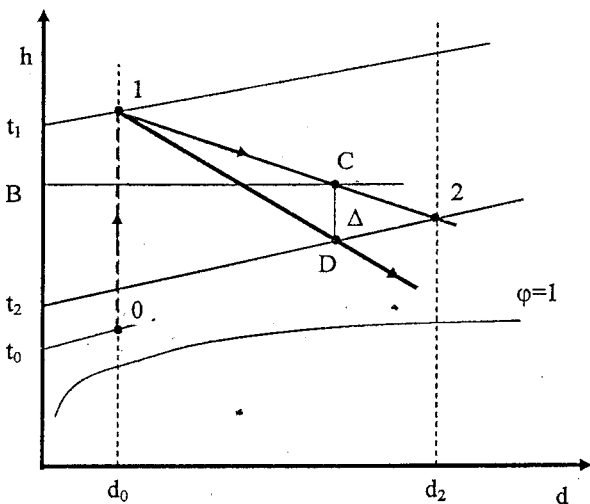


Рисунок 8.1 – Побудова дійсного процесу сушки в h-d діаграмі

Приклад 8.1

Спроекувати камерну сушарку з частковою рециркуляцією теплоносія для сушіння порізанних яблук

Тривалість періоду сушіння – 12 годин.

Вологість матеріалу (рахуючи на загальну масу)

- початкова.....85%;
- кінцева18%.

Вибір типу сушарки

Встановлюємо фактори, що впливають на вибір сушарки:

- агрегатний стан: різані шматки;
- рідина, яка видаляється, вода;
- максимальна температура сушіння: не більше 70 °С;
- продуктивність сушарки 2 т/добу (за вологим продуктом).

8.1.4 Технологічний розрахунок і визначення продуктивності сушарки

Літературні дані вказують на те, що за товщини шару сировини 40 мм і постійних умовах сушіння критична вологість наступає за 31% (на загальну масу), рівноважна вологість 5% (на загальну масу), загальний час сушіння 11 годин.

Приймаємо, що для завантаження і розігріву матеріалу потрібно 0,5 годин, для вивантаження 0,5 годин. Тоді загальна тривалість однієї операції $11 + 0,5 + 0,5 = 12$ годин. та число операцій за добу $24:12 = 2$.

Приймаючи, що для сушарки, пов'язаної з іншим відділеннями цеху, число робочих днів в році 330, знайдемо потрібний об'єм сушарки за висушеним продуктом.

Кількість випаруваної вологі в сушарці

$$W = G_m \frac{w_n - w_k}{100 - w_k} = 3000 \frac{85 - 18}{100 - 18} = 2451 \text{ кг / період.}$$

Вихід готової сировини

$$G_{\text{вх}} = G_m - W = 3000 - 2451 = 549 \text{ кг / період.}$$

Для нарізаних яблук норми насипання на піддони складають $g_n = 14 \text{ кг/м}^2$ [6]. Тоді, якщо використати піддони розміром 900×900 мм, місткість одного піддона складе

$$g_1 = g_n \cdot f_1 = 14 \cdot (0,9 \cdot 0,9) = 11,34 \text{ кг/піддон.}$$

Отже, для забезпечення потрібної продуктивності сушарка повинна вмщати

$$n = \frac{G_m}{g_1} = \frac{3000}{11,34} = 264 \text{ шт.}$$

8.1.5 Визначення тривалості окремих періодів сушіння

В сушарці камерного типу умови сушіння приблизно однакові: напрямки руху повітря не змінюється, температура повітря незначно падає до кінця кожної зони сушіння і знову отримує майже початкові значення після проходження повітря через калорифер, міра насичення повітря змінюється у відносно невеликих межах. Крім того, призначенням певного тем-

пературного режиму в кожній зоні забезпечується приблизно однаковий сушильний потенціал. Таким чином, за правильного регулювання досягається рівномірне висушування матеріалу по всій сушарці. Отже, можна припустити, що матеріал висихає за сталих умов сушіння і можна визначити тривалість першого і другого періодів сушіння за відповідними формулами. Очевидно результати такого підрахунку дадуть лише незначне відхилення від дійсного протікання процесу.

За початковими умовами висушування сировини:

– початкова вологість – 85% на загальну масу, тобто

$$w'_n = \frac{85 \cdot 100}{100 - 85} = 566,7\% \text{ на суху масу;}$$

– критична вологість – 31% на загальну масу, тобто

$$w'_{kp} = \frac{31 \cdot 100}{100 - 31} = 44,9\% \text{ на суху масу;}$$

– кінцева вологість – 18% на загальну масу, тобто

$$w'_k = \frac{18 \cdot 100}{100 - 18} = 21,95\% \text{ на суху масу;}$$

– рівноважна вологість – 5% на загальну масу, тобто

$$w'_p = \frac{5 \cdot 100}{100 - 5} = 5,26\% \text{ на суху масу.}$$

Загальна тривалість сушіння 12 год. Знаходимо значення коефіцієнта швидкості сушіння

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{w'_n - w'_{kp}}{k} + \left(\frac{w'_{kp} - w'_p}{k} \ln \frac{w'_{kp} - w'_p}{w'_k - w'_p} \right),$$

або

$$w'_k = \frac{18 \cdot 100}{100 - 18} = 21,95\% \quad \frac{12}{3600} = \frac{566,7 - 44,9}{k} \left(\frac{44,9 - 5,26}{k} \ln \frac{44,9 - 5,26}{21,95 - 5,26} \right),$$

звідки $k = 0,0129 \frac{\text{кг вологи}}{\text{с} \cdot \text{кг сух. реч.}}$.

Тривалість першого періоду сушіння

$$\tau_1 = \frac{w'_n - w'_{kp}}{k} = \frac{566,7 - 44,9}{0,0129 \cdot 3600} = 11,2 \text{ а.}$$

Тривалість другого періоду – періоду падаючої швидкості сушіння – знаходимо із різниці

$$\tau_2 = \tau - \tau_1 = 12 - 11,2 = 0,8 \text{ год.}$$

Знайшовши тривалість окремих періодів сушіння, переходимо до складання матеріального балансу сушарки.

8.1.6 Матеріальний баланс

Впродовж всього процесу сушіння необхідно видалити 2451 кг вологи. З цієї кількості, в першому періоді видаляється

$$W_1 = G_m \frac{w_n - w_{kp}}{100 - w_{kp}} = 3000 \frac{85 - 31}{100 - 31} = 2347,8 \text{ кг / період.}$$

Згідно із знайденим вище, перший період продовжується 11,2 год, і в цьому періоді годинне випаровування вологи $\frac{2347,8}{11,2} = 209,6 \text{ кг / год.}$ Дру-

гий період (період падаючої швидкості) продовжується 0,8 години. В цьому періоді фактично проходить досушування сировини, а годинна кількість випаруваної вологи складе $\frac{2451 - 2347,8}{0,8} = 130 \text{ кг / год.}$ Оскільки го-

динна кількість випаруваної вологи в першому періоді значно більша, то розрахунок поверхні калорифера повинен бути виконаний на основі першого періоду сушіння.

Баланс вологи:

	Прихід, кг	Витрата, кг
Потрапило вологи з матеріалом	$3000 \cdot 0,85 = 2550$	-
Видаляється вологи в першому періоді	-	2347,8
Видаляється вологи в другому періоді	-	$2451 - 2347,8 = 103,2$
Залишається вологи в матеріалі	-	$2550 - 2451 = 99$

8.1.7 Розрахунок витрати повітря та теплоти в першому періоді

Атмосферне повітря беремо із цеху з такими характеристиками: $\varphi_0 = 0,7$, $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, за діаграмою знаходимо $d_0 = 0,014 \text{ кг/кг}$.

Прийmemo, що повітря на виході повинно мати $\varphi_2 = 0,55$, $t_2 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ і, значить, $d_2 = 0,101 \text{ кг/кг}$.

Оскільки в сушарці даного типу неможливо досягнути (для вихідного повітря) відносної вологості 55% за один прохід, то потрібно застосувати режим із рециркуляцією повітря.

Обчислимо відсотковий склад пароповітряної суміші, що циркулює в сушарці, прийнявши, що температура суміші після калорифера рівна $100 \text{ }^\circ\text{C}$ та повітря в кожній зоні сушарки насичується до $\varphi = 55\%$. Для цього всі зміни стану пароповітряної суміші побудуємо в h-d діаграмі вологого пові-

тря. З кінцевої точки процесу ($\varphi_2 = 0,55$, $t_2 = 65^\circ\text{C}$) проведемо пряму, паралельну лініям постійної ентальпії ($h = \text{const}$), до перетину із ізотермою $t_1 = 100^\circ\text{C}$; із цієї точки проводимо пряму $d = \text{const}$, до зустрічі із $\varphi = 55\%$. Знайдена точка відображає стан пароповітряної суміші після другої зони сушарки (яка потрапляє в третій калорифер), і якій, як видно з h - d діаграми, відповідають параметри $d = 0,0858$ кг/кг, $t = 62^\circ\text{C}$.

Із точки, яка відповідає стану повітря на виході із другої зони сушарки, знову проводимо пряму $h = \text{const}$, до перетину із лінією $t = 100^\circ\text{C}$, на якій лежить точка, що характеризує стан повітря на вході до другої зони ($t = 100^\circ\text{C}$, $d = 0,069$ кг/кг). Потім знаходимо характеристики повітря яке покидає першу зону сушарки: $d = 0,069$ кг/кг, $t = 58^\circ\text{C}$. Виконуючи аналогічну побудову, знайдемо стан суміші: $d_{\text{см}} = 0,051$ кг/кг, $t_{\text{см}} = 44^\circ\text{C}$, $h_{\text{см}} = 176$ кДж/кг.

З'єднавши точку суміші знайдену за $d_{\text{см}}$ і $t_{\text{см}}$ з точкою, яка характеризує стан свіжого (атмосферного) повітря, отримаємо зображення усього процесу в h - d координатах. Нагадаємо, що така побудова відповідає лише теоретичному процесу, тобто процесу, що проходить без теплових втрат і без врахування початкової ентальпії вологи яка надходить із матеріалом, оскільки лише в цьому випадку процес випаровування може бути зображений прямою лінією, паралельною лінії постійної ентальпії. Отже, $d_{\text{см}} = 0,051$ кг/кг, $d_0 = 0,014$ кг/кг, $d_2 = 0,101$ кг/кг.

Маючи характеристику суміші свіжого і відпрацьованого повітря ми можемо знайти склад суміші і коефіцієнт рециркуляції

$$n = \frac{d_2 - d_{\text{см}}}{d_2 - d_0} = \frac{0,101 - 0,051}{0,101 - 0,014} = 0,575,$$

або у відсотках: свіжого повітря 57,5%, відпрацьованого 42,5%.

Витрата повітря (суміші):

$$\ell = \frac{W}{d_2 - d_{\text{см}}} = \frac{209,6}{0,101 - 0,051} = 4192 \text{ кг/год.}$$

де 209,6 кг – кількість вологи, яка повинна бути видалена за 1 годину в першому періоді сушіння.

В теоретичному випадку витрата повітря (суміші)

$$\ell_t = \frac{4192}{209,6} = 20 \text{ кг/кг.}$$

За h - d діаграмою знаходимо

$$h_0 = 61 \text{ кДж/кг; } h_2 = 331 \text{ кДж/кг; } h_{\text{см}} = 176 \text{ кДж/кг.}$$

Тоді теоретична питома витрата теплоти

$$q = \frac{h_2 - h_{cm}}{d_2 - d_{cm}} = \frac{331 - 176}{0,101 - 0,051} = 3100 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

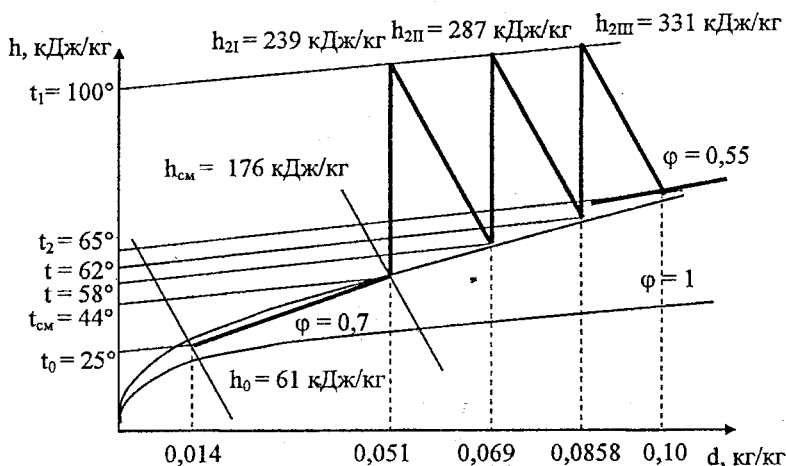


Рисунок 8.2 – Побудова процесу сушіння в камерній сушарці з частковою рециркуляцією і проміжним підігрівом теплоносія

Нами було прийнято, що відпрацьоване повітря на виході із сушарки з температурою 65 °С та вологістю 55%. Далі було знайдено, що повітря, яке покидає другу зону, має $t_3 = 62$ °С та $d_3 = 0,0858$ кг/кг; повітря, яке покидає першу зону, має $t_2 = 58$ °С, $d_2 = 0,069$ кг/кг. Для того, щоб ці умови були дотримані за реального процесу, тобто, за наявності теплових втрат, температуру підігріву повітря в кожному калорифері можна трохи підвищити за порівнянням з тією, яка визначена для теоретичного процесу.

Для визначення істинної температури, до якої потрібно підігріти повітря в кожному калорифері, потрібно аналітичним шляхом знайти теплові втрати сушарки в кожній зоні, а потім перейти до побудови реального процесу в h - d координатах.

В вибраній сушарці поверхня охолодження по зонах складає: для першої зони 16 м², для другої – 7 м², для третьої – 13 м².

8.1.8 Розрахунок коефіцієнта теплопередачі через стінку сушарки

Коефіцієнт теплопередачі через стінку сушарки (рис. 8.3) може бути знайдений за звичайними формулами теплопередачі.

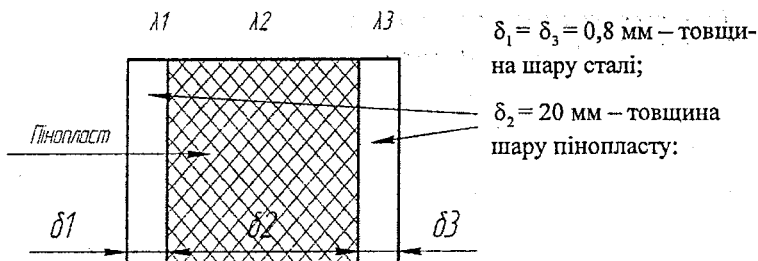


Рисунок 8.3 – Розріз теплоізоляції сушарки

Визначальна температура

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2},$$

$$t = \frac{20 + 65}{2} = 42,5^\circ\text{C}.$$

З таблиці теплофізичних властивостей сухого повітря визначаємо основні параметри (за результатами інтерполяції):

- коефіцієнт динамічної в'язкості: $\nu = 17,20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$
- коефіцієнт теплопровідності: $\lambda = 2,77 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$
- критерій Прандтля: $Pr = 0,699;$
- коефіцієнт температуропровідності $a = 24,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$

8.1.9 Тепловіддача від повітря до стінок робочої камери.

Визначаємо критерій Рейнольдса для вимушеної конвекції

$$Re = \frac{\omega \cdot h}{\nu} = \frac{4 \cdot 1}{17,2 \cdot 10^{-6}} = 232558.$$

Оскільки $Re = 232558 < 5 \cdot 10^5$, отже режим руху повітря у сушарці турбулентний.

Визначаємо критерій Нуссельта, для турбулентного руху вздовж плоскої поверхні, скористаємось таким критеріальним рівнянням

$$Nu = 0,66 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} = 0,66 \cdot 232558^{0,5} \cdot 0,699^{0,33} = 282.$$

Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_1 = \frac{\lambda \cdot Nu}{h},$$

$$\alpha_1 = \frac{2,77 \cdot 10^{-2} \cdot 282}{1} = 7,8 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

Тепловіддача від зовнішніх стінок

Коефіцієнт термічного розширення повітря

$$\beta = \frac{1}{T},$$

$$\beta = \frac{1}{42,5 + 273} = 0,0032.$$

Критерій Релея

$$Ra = Pr \cdot Gr = Pr \cdot \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot \ell^3}{\nu^2} = 0,699 \frac{9,8 \cdot 0,0032 \cdot 45 \cdot 1,41^3}{(17,2 \cdot 10^{-6})^2} = 9,53 \cdot 10^9.$$

Критерій Нуссельта для вільної конвекції

$$Nu = 0,5 Ra^{0,25} = 0,5 \cdot (9,53 \cdot 10^9)^{0,25} = 156,23.$$

Коефіцієнт тепловіддачі для вертикальних стінок

$$\alpha_2 = \frac{\lambda \cdot Nu}{\ell} = \frac{156,23 \cdot 2,77 \cdot 10^{-2}}{1,41} = 3,07 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

Для розрахунку тепловіддачі через стелю і дно робочої камери сушарки приймемо, що питомий тепловий потік становить 75% від потоку через стінки [7]

$$\alpha_3 = 0,75 \cdot \alpha_2 = 0,75 \cdot 3,07 = 2,3 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

Приведений коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_{\text{екв}} = (4\alpha_2 + 2\alpha_3)/6 = (4 \cdot 3,07 + 2 \cdot 2,3)/6 = 2,8 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

Сумарний термічний опір теплопровідності через стінки камери сушарки

$$\Sigma R = \frac{\delta_1}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{шт}} + \frac{\delta_3}{\lambda_{ст}} = \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{45} + \frac{20 \cdot 10^{-3}}{0,05} + \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{45} = 0,4 \left(\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \right)$$

Коефіцієнт теплопередачі

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma R + \frac{1}{\alpha_{кр}}} = \frac{1}{\frac{1}{9,78} + 0,4 + \frac{1}{2,8}} = 1,569 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right)$$

Знаходимо теплові втрати кожної зони сушарки.

Теплові втрати обчислюємо за рівнянням теплопередачі

$$Q = kF\Delta t$$

де k – коефіцієнт теплопередачі через стінку сушарки;

F – поверхня охолодження даної зони сушарки;

Δt – різниця між температурою повітря в даній зоні сушарки і температурою навколишнього середовища.

Теплові втрати першої зони в навколишнє повітря

$$Q_1 = 1,569 \cdot 16 \cdot \left(\frac{100+58}{2} - 25 \right) = 1355 \text{ Вт} = 1,355 \text{ кВт}.$$

Тобто, на 1 кг вологи, що випаровується в першому періоді сушіння, витрачається

$$\Delta_1 = \frac{1355 \cdot 3600}{209,6} = 23273 \text{ Дж/кг}.$$

На 1 кг повітря

$$\frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{23273}{20} = 1164 \text{ Дж/кг}.$$

Теплові втрати другої зони

$$Q_{II} = 1,569 \cdot 7 \left(\frac{100 + 62}{2} - 25 \right) = 615 \text{ Вт.}$$

Які на 1 кг вологи складають

$$\Delta_{II} = \frac{615 \cdot 3600}{130} = 17032 \text{ Дж / кг.}$$

На 1 кг повітря

$$\frac{\Delta_{II}}{\ell} = \frac{17032}{20} = 852 \text{ Дж / кг.}$$

Теплові втрати третьої зони

$$Q_{III} = 1,569 \cdot 13 \left(\frac{100 + 62}{2} - 25 \right) = 1142 \text{ Вт.}$$

Що на 1 кг складає

$$\Delta_{III} = \frac{1142 \cdot 3600}{209,6} = 19618 \text{ Дж / кг.}$$

На 1 кг повітря

$$\frac{\Delta_{III}}{\ell} = \frac{19618}{20} = 980 \text{ Дж / кг.}$$

Визначивши теплові втрати кожної зони сушарки, перейдемо до побудови реального процесу в $h-d$ координатах (рис. 8.4). Для цього із кожної точки, яка відповідає стану повітря, яке входить в кожну зону, відкладемо відповідний відрізок Δ/L в масштабі по ентальпії вгору (тому, що в нашому випадку Δ є втратою тепла і тому має від'ємне значення). Отримані точки з'єднаємо з точками, які відповідають початковому стану повітря на виході із кожної зони. Таким чином, виходить зображення діючого процесу сушіння, тобто, з врахуванням теплових втрат сушарки.

Проведемо побудову процесу сушіння в третій зоні сушарки на $h-d$ діаграмі.

Як було знайдено вище, $\frac{\Delta_{III}}{\ell} = 980 \text{ Дж / кг} = 0,98 \text{ кДж / кг}$.

Відрізок, який відповідає $0,98 \text{ кДж / кг}$, відкладається по вертикалі вгору із початкової точки процесу, яка має координати $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ та

$h_2 = 331$ кДж/кг. Цю точку з'єднуємо з точкою, яка має параметри $\phi = 0,55$ та $t_2 = 65$ °С. Отримана пряма є зображенням реального процесу випаровування, який протікає в третій зоні сушарки. Повторюючи аналогічну побудову для другої і першої зони, отримуємо зображення реального процесу сушіння на $h-d$ діаграмі. В результаті побудови бачимо, що температура повітря на виході з першого калорифера 102 °С, з другого 100,5 °С, а з третього 101 °С.

Фактична витрата теплоти на випаровування 1 кг вологи

$$q = 3100 + 23,273 + 17,032 + 19,618 = 3160 \text{ кДж/кг.}$$

Отже, годинна витрата теплоти на випаровування вологи з врахуванням теплових втрат в першому періоді сушіння

$$Q_I = \frac{3160 \cdot 209,6}{3600} = 184 \text{ кВт.}$$

В другому періоді сушіння

$$Q_{II} = \frac{3160 \cdot 130}{3600} = 114 \text{ кВт.}$$

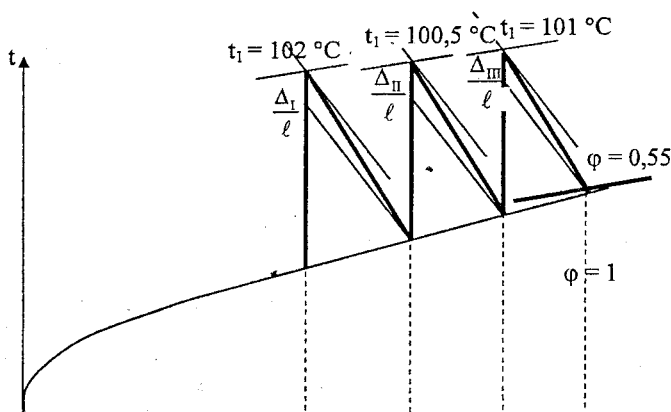


Рисунок 8.4 – Схема графічного розрахунку процесу сушіння в камерній сушарці з врахуванням теплових втрат

8.1.10 Перевірка тривалості пускового періоду

Витрата тепла в пусковому періоді складається із витрати теплоти на розігрів обладнання та сировини. Деяка кількість вологи випаровується в пусковому періоді. Вважаючи, що випаровування починається лише в

першому періоді, ми перебільшимо витрату теплоти в основній стадії процесу і таким чином створюємо деякий запас поверхні нагріву.

Маса обладнання складається із маси вагонеток (502 кг), піддонів (130 кг), корпусу сушарки з калориферами (3270 кг) та дерев'яних частин сушарки (634 кг). Якщо прийняти $C_{\text{зал}} = 0,5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $C_{\text{дер}} = 1,38 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ та визначити середню температуру

$$t_{\text{cp}} = \frac{t_{1\text{cp}} + t_{2\text{cp}}}{2} = \frac{\frac{102+105+101}{3} + \frac{52+62+65}{3}}{2} = 81,5 \text{ }^\circ\text{C},$$

тоді витрата теплоти на розігрів сушарки і обладнання складає:

$$Q_{06} = [(502+130+3270) \cdot 0,5 + 634 \cdot 1,38] \cdot (81,5 - 25) = 159700 \text{ кДж}.$$

Витрата теплоти на нагрівання матеріалу за $G_{\text{мат}} = 3000 \text{ кг}$, $\theta_{\text{мат}} = 51 \text{ }^\circ\text{C}$ (що відповідає середній температурі мокрого термометра за діаграмою вологого повітря); $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; теплоємність яблук $C_x = 3,17 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Тоді:

$$Q_{\text{мат}} = 3000 \cdot 3,17 \cdot (51 - 25) = 247300 \text{ кДж}.$$

$$Q_{\text{пуск}} = 159700 + 247300 = 407000 \text{ кДж}.$$

За прийнятої тривалості пускового періоду 0,5 години, годинна витрата теплоти в пусковому періоді

$$t_{\text{cp}} = \frac{t_{1\text{cp}} + t_{2\text{cp}}}{2} = \frac{\frac{102+105+101}{3} + \frac{52+62+65}{3}}{2} = 81,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$Q_n^* = \frac{407000}{1,75 \cdot 3600} = 65 \text{ кВт}.$$

Отже, якщо поверхню нагріву обчислити з розрахунку теплоти 184 кВт, як для першого періоду, вона буде мати значний запас, і пусковий період в дійсності буде коротшим.

8.1.11 Тепловий баланс

Витрата теплоти на один період сушіння, за умови використання парових калориферів

$$Q_{10} = Q_n \cdot \tau_n \cdot 3600.$$

В пусковому періоді..... $65 \cdot 0,5 \cdot 3600 = 117000 \text{ кДж}$;

В першому періоді..... $184 \cdot 11,2 \cdot 3600 = 7418880 \text{ кДж}$;

В другому періоді..... $114 \cdot 0,8 \cdot 3600 = 328320 \text{ кДж}$.

Разом..... 7864200 кДж

Витрата пари на одну операцію

$$D = \frac{Q_*}{r} = \frac{7864200}{2141} = 3673 \text{ кг.}$$

де 2141 Дж/кг – теплота конденсації пари (за тиску $P_{\text{абс}} = 400$ кПа).
Витрата теплоти на випаровування вологи

$$Q_b = W \cdot r = 2451 \cdot 2141 = 5247591 \text{ кДж.}$$

ККД сушарки

$$\eta = \frac{5247591}{7864200} = 0,67.$$

8.2 Розрахунки пневматичних сушарок

Найбільш простими пневмосушарками є пневмотруби, в яких здійснюється прямолінійний рух матеріалу і сушильного агента.

Частіше за все зустрічаються пневматичні труби-сушарки з висхідним рухом. Схеми сушарок даного типу наведені в [8, 9].

Сушильна камера складається із вертикальної труби, в яку вентилятором нагнітається підігріте в калорифері повітря. При сушінні газами в трубу-сушарку надходить суміш повітря і газів з топки. Висушуваний матеріал із бункера за допомогою живильника надходить у нижню частину труби, де підхоплюється сушильним агентом і транспортується до пиловловлювача. Частинки сухого матеріалу відділяються у циклоні, а газ надходить на додаткове очищення в рукавний фільтр, після чого скидається в атмосферу. Відносна швидкість газу і матеріалу в трубі наближається до швидкості витання частинок. Винятком є лише розгінна дільниця, де відносна швидкість змінюється від швидкості газу до швидкості, яка дорівнює різниці швидкості газу і швидкості витання частинок.

На розгінній ділянці внаслідок неусталеності процесів здійснюється інтенсивне випаровування вологи із матеріалу, яке знижується у міру гідродинамічної стабілізації потоку.

8.2.1 Основні розрахункові залежності

Швидкість витання сферичних частинок, м/с

$$v_{\text{во}} = A_r \cdot v_{\text{см}} [(18 + 0,61 A_r^{0,5}) d_c]. \quad (8.31)$$

Швидкість витання частинок довільної форми, м/с

$$v_B = v_{B0} / \Phi^{0,5} \quad (8.32)$$

Швидкість газу в сушиарці приймають в межах $W_r = 1,2 \dots 2$.
Середній температурний потенціал процесу сушіння, °C

$$\Delta t_{cp} = (t_1 - t_{mT}) - (t_2 - t_{mT}) \cdot [\ln(t_1 - t_{mT}) - (t_2 - t_{mT})]^{-1} \quad (8.33)$$

де t_{mT} – температура мокрого термометра сушильного агента, що визначається з h-d діаграми.

Критеріальне рівняння міжфазного теплообміну за [5]

$$Nu = 2 + 0,51 Re_u^{0,52} \cdot Pr^{0,33}, \quad (8.34)$$

де $Re_u = u \cdot d_e / \nu_{cm}$; $Pr = \nu_{cm} / a_{cm}$; $u = W_r - v_B$.
Коефіцієнт міжфазної тепловіддачі, Вт/(м²·К)

$$A = Nu \cdot \lambda_{cm} / d_e. \quad (8.35)$$

Питома поверхня частинок, 1/м

$$S = 6 \cdot f / d_e. \quad (8.36)$$

Необхідний час сушіння, с

$$\tau = C_{cm} G_{cm} \rho_v (t_1 - t_2) / (G_m \alpha S \Delta t_{cp}), \quad (8.37)$$

де $\rho_v = \rho_m (1 + \omega_2)$ – об'ємна густина матеріалу.

Час проходження розгінної ділянки, с

$$\tau_p = \ln \{ (u_k + A) \cdot (w_r + B) \cdot (w_r + A) \}^{-1} / c. \quad (8.38)$$

Тут $A = av + c$; $B = (av - c) / (2a)$; $C = |d|^{0,5}$; $a = 0,346 K_\Phi / (d_e \rho_v)$;
 $b = 65 \nu_{cm} / (K_\Phi \cdot d_e)$; $d = 37,24a - a^2 v^2$; $K_\Phi = 11 - 10/f$; $u_k = v_B / 0,95$.

Висота розгінної ділянки, м

$$H_p = w_r \cdot \tau_p - 1/a \cdot \ln x - A \cdot \tau_p, \quad (8.39)$$

де $x = [(u_k + A) \exp(c \cdot \tau_p) - (w_r + B) / A \cdot v - A \tau_p]$.

Загальна висота пневмосушарки, м

$$H = H_p + H_{ст} = H_p + (W_r - v_B) \cdot \tau. \quad (8.40)$$

Масова витратна концентрація частинок, кг/кг

$$\mu_{\text{ч}} = 0,5 \cdot (G_1 + G_2)/G_{\text{см}}. \quad (8.41)$$

Загальний коефіцієнт аеродинамічного тертя

$$\xi_3 = \xi_0 + \xi_{\text{ст}} + \xi_{\text{р}} + \xi_{\text{мг}} + \xi_{\text{мгт}}, \quad (8.42)$$

де $\xi_0 = \lambda \cdot H/D$; $\lambda = 0,0052 + 0,5 \text{ Re}_u^{-0,32}$;

$\xi_{\text{ст}} = 2 \cdot F_{\Gamma} \cdot \mu_{\text{ч}}$; $F_{\Gamma} = g \cdot D/w_{\Gamma}^2$;

$\xi_{\text{р}} = 2\mu_{\text{ч}}[0,95(1 - V_{\text{в}}/w_{\Gamma} - u_0/w_{\Gamma})]$;

$\xi_{\text{мг}} = \xi_{\text{мгт}} \cdot \mu_{\text{ч}}$; $\xi_{\text{мг}}$ – сумарний коефіцієнт місцевих втрат труби-сушарки;

D – діаметр труби;

u_0 – швидкість частинок на вході в трубу.

Гідравлічний опір труби-сушарки, Па

$$\Delta P_{\text{тс}} = 0,5 \xi_3 \cdot \rho_{\text{см}} w_{\Gamma}^2. \quad (8.43)$$

Загальні втрати напору на сушильній установці, Па

$$\Delta P_{\text{су}} = \Delta P_{\text{тс}} + \Delta P_{\text{ц}} + \Delta P_{\text{мц}} + \Delta P_{\text{ф}}, \quad (8.44)$$

де $\Delta P_{\text{ц}}$, $\Delta P_{\text{мц}}$ і $\Delta P_{\text{ф}}$ – втрати напору в циклоні, мультициклоні і фільтрі відповідно, які приймаються за довідковими даними.

Приклад 8.2

Розрахувати прямоструминну пневматичну трубу-сушарку за даними: продуктивність сухого матеріалу $G_{\text{м}} = 500$ кг/год; вологості матеріалу $\omega_1 = 0,25$, $\omega_2 = 0,03$, $\omega_{\text{кр}} = 0,08$ кг/кг; середній діаметр частинок $d_e = 0,08$ мм; фактор форми частинок $f = 1,2$; теплоємність сухого матеріалу $C_{\text{м}} = 1,55$ кДж/(кг·К); густина матеріалу $\rho_{\text{м}} = 1450$ кг/м³; температури висушуваного матеріалу $t_{\text{м1}} = 20$ °С, $t_{\text{м2}} = 60$ °С; температура повітря перед сушаркою $t_1 = 140$ °С; параметри навколишнього повітря: $\phi_0 = 90\%$, $t_0 = -2$ °С; витрата повітря $G_{\text{пв}}^* = 6600$ кг/год.

Розрахунок

Будуємо на h - d діаграмі процес нагрівання повітря в калорифері (лінія 0 – 1) і визначаємо параметри в точках 0 і 1

$$h_0 = 6 \text{ кДж/кг}; d_0 = 0,003 \text{ кг/кг}; h_1 = 148 \text{ кДж/кг}.$$

Кількість випаруваної вологи, кг/год

$$W = G_{\text{м}}(\omega_1 - \omega_2) = 500 \cdot (0,25 - 0,03) = 110.$$

Питома витрата повітря, кг/кг

$$\ell_0 = G_{\text{пв}}/W = 6600/110 = 60.$$

Кінцевий вологовміст повітря, кг/кг

$$d_2 = d_0 + 1/\ell_0 = 0,003 + 1/60 = 0,017.$$

Питомі втрати теплоти кДж/кг:

- на нагрівання матеріалу

$$q_v = G_M (C_M + C_v \omega_2)(t_{M2} - t_{M1})/W = \\ = 500(1,55 + 4,187 \cdot 0,03) \cdot (60 - 20)/110 = 305;$$

- на видалення зв'язаної вологи

$$q_{зв} = a_3(\omega_{кр} - \omega_2)^2/[2(\omega_1 - \omega_2)] = 4187(0,08 - 0,03)^2/[2(0,25 - 0,03)] = 25;$$

- питомі втрати в навколишнє середовище приймаємо $q_6 = 280$ кДж/кг.

Значення сумарних втрат теплоти в сушарці, кДж/кг

$$\Delta = C_v t_{M1} - (q^M + q_{зв} + q_5) = 4,187 \cdot 20 - (305 + 280 + 25) = -565.$$

З побудови робочого процесу в сушильній камері на діаграмі визначаємо температуру сушильного агента на виході з сушарки: $t_2 = 95^\circ\text{C}$.

Середні параметри повітря в сушарці

$$t_{cp} = 0,5(t_1 + t_2) = 0,5(140 + 95) = 117,5^\circ\text{C},$$

$$d_{cp} = 0,5(d_1 + d_2) = 0,5(0,003 + 0,017) = 0,0086$$

Властивості сушильного агента, обчислені за формулами (8.10)...(8.13)

$$\rho_{cm} = 0,9 \text{ кг/м}^3; \mu_{cm} = 22,9 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}; C_{cm} = 1,02 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)};$$

$$\lambda_{cm} = 2,66 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)};$$

$$a_{cm} = \lambda_{cm}/(\rho_{cm} \cdot C_{cm}) = 2,66 \cdot 10^{-2}/(1,02 \cdot 10^3 \cdot 0,9) = 28,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$Pr_{cm} = \nu_{cm}/a_{cm} = \mu_{cm}/(\rho_{cm} \cdot a_{cm}) = 22,9 \cdot 10^{-6}/(1,02 \cdot 28,9 \cdot 10^{-6}) = 0,776.$$

Об'ємна і середня густина матеріалу, кг/м³

$$\rho_v = \rho_M (1 + \omega_2) = 1450/(1 + 0,03) = 1408;$$

$$\bar{\rho}_M = \rho_v (1 + \omega_2) = 1400[1 + 0,5(0,25 + 0,03)] = 1605.$$

Об'ємна витрата повітря, м³/с

$$V_{cm} = G_{пв} (1 + d_{cp}) / (\rho_{cm} \cdot 3600) = 6600(1 + 0,0086) / (0,9 \cdot 3600) = 2.$$

Критерій Архімеда

$$Ar = \rho^* \cdot g \cdot d_e^3 / \nu_{cm}^2 = 1782 \cdot 9,8(0,5 \cdot 10^{-3})^3 / (23,9 \cdot 10^{-6})^2 = 3794,$$

де $\rho^* = (\bar{\rho}_m - \rho_{cm}) / \rho_{cm} = (1605 - 0,9) / 0,9 = 1782$.

Критерій Рейнольдса для витання

$$Re_{во} = Ar / (18 + 0,61 \cdot Ar^{0,5}) = 3794(18 + 0,61 \cdot 3794^{0,5}) = 68,3.$$

Швидкість витання сферичної частинки, м/с

$$V_{во} = Re_{во} \cdot \nu_{cm} / d_e = 68,3 \cdot 23,9 \cdot 10^{-6} / 0,5 \cdot 10^{-3} = 3,4.$$

Фактор обтікання за (8.17)

$$\Phi = f^{0,9} \cdot Re_{во}^m = 1,2^{0,9} \cdot 68,3^{0,5} = 1,56.$$

Швидкість витання частинок, м/с

$$V_{в} = V_{во} \cdot \Phi^{0,5} = 3,4 \cdot 1,56^{0,5} = 2,65.$$

Швидкість повітря в сушарці, м/с

$$W_r = 2V_{в} = 2 \cdot 2,65 = 5,3.$$

Критерій Рейнольдса відносного руху частинок

$$Re_u = u \cdot d_e / \nu_{cm} = (5,3 - 2,64) \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} / 23,9 \cdot 10^{-6} = 55,4.$$

Критерій Нуссельта міжфазного теплообміну

$$Nu = 2 + 0,51 Re_u^{0,52} Pr^{0,33} = 2 + 0,51 \cdot 55,4^{0,52} \cdot 0,776^{0,33} = 5,86.$$

Коефіцієнт міжфазного теплообміну, Вт/(м²·К)

$$A = Nu \cdot \lambda_{cm} / d_e = 5,86 \cdot 2,66 \cdot 10^{-2} / 0,5 \cdot 10^{-3} = 312.$$

Температурний потенціал сушарки, °С

$$\begin{aligned} \Delta t_{cp} &= (t_1 - t_{мг}) - (t_2 - t_{мг}) - [\ln(t_1 - t_{мг}) / (t_2 - t_{мг})]^{-1} = \\ &= (140 - 144) - (195 - 60) / \ln(96/35) = 58,5. \end{aligned}$$

Питома поверхня дисперсної фази, 1/м

$$S = 6f/d_e = 6 \cdot 1,2/0,5 \cdot 10^{-3} = 14400.$$

Питома втрата повітря, кг/кг.

$$g_{cm} = G_{cm}/G_M = 6600/500 = 13,2.$$

Тривалість сушіння, с

$$\begin{aligned} \tau &= C_{cm} \cdot g_{cm} \cdot \rho_v (t_1 - t_2) / (\alpha \cdot S \cdot \Delta t_{cp}) = \\ &= 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot 13,2 \cdot 1408 (140 - 95) / (312 \cdot 14400 \cdot 58,5) = 4. \end{aligned}$$

Дійсний час перебування частинок в сушарці більший, ніж τ , оскільки не врахований час на розгін частинок. Цей час τ_p йде у запас, що гарантує вихід матеріалу із заданою вологістю.

Значення коефіцієнтів у (8.38) і тривалість проходження розгінної ділянки, с

$$\begin{aligned} a &= 11; b = 1,18; k_f = 2,67; d = -44,2; c = 6,6; A = 3,6; B = -2,5; U_k = 2,8. \\ \tau_p &= \ln\{[(2,8 + 3,6)(5,3 - 2,5)] / [(2,8 - 2,5)(5,3 + 3,6)]\} / 6,6 = 0,29. \end{aligned}$$

Висота розгінної ділянки за (8.39), м

$$H_p = 5,3 \cdot 0,29 - 1/1,1 \cdot \ln 313,68 - 3,6 \cdot 0,29 = 0,54.$$

$$\text{де } x = [(5,3 + 3,6) \exp(0,29 \cdot 6,6) - (5,3 - 2,5)] / (3,6 + 2,5) = 313,68.$$

Загальна висота труби-сушарки, м

$$H = H_p + (\omega_r - V_v) / \tau = 0,54 + (5,3 - 2,64) \cdot 4 = 11,1.$$

Масова концентрація дисперсної фази, кг/кг

$$\mu_c = 0,5(G_1 + G_2) / G_{cm} = 0,5 \cdot (625 + 515) / 6600 = 0,086,$$

$$\text{де } G_1 = G_M(1 + \omega_1) = 500(1 + 0,25) = 625,$$

$$G_2 = G_M(1 + \omega_2) = 500(1 + 0,03) = 515.$$

Діаметр труби-сушарки, м

$$D = [4V_{cm} / (3,14 w_r)]^{0,5} = [4 \cdot 2 / (3,14 \cdot 5,3)]^{0,5} = 0,693.$$

Приймаємо $D = 0,7$ м.

Поверхня теплообміну апарата, м²

$$F = \Pi \cdot d \cdot h = 3,14 \cdot 0,7 \cdot 11,1 = 24,5.$$

Приймаємо товщину стінки труби $\delta_{ст} = 3$ мм, товщину шару асбестової ізоляції $\delta_{із} = 16$ мм, температуру зовнішньої стінки труби $t_{зн} = 45$ °С; температуру повітря у приміщенні $t_{пр} = 20$ °С. Оскільки $\mu_{ч} < 1$, то коефіцієнт теплообміну всередині труби можна розрахувати за рівнянням для однофазного потоку [2] при значенні критерію Рейнольдса

$$Re = \omega_r \cdot D / \nu_{см} = 5,3 \cdot 0,7 / 23,9 \cdot 10^{-6} = 15,4 \cdot 10^4.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки труби визначається за рівнянням для вільної конвекції [3] за $\Delta t = t_{зн} - t_{пр}$. Коефіцієнт тепловіддачі k через стінку апарата можна обчислювати за рівнянням для плоскої стінки. Розрахунки дають

$$\alpha_1 = 9,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \alpha_2 = 11,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); k = 3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

За температурний напір можна прийняти значення, °С

$$\Delta t = t_{пр} - t_{пр} = 117,5 - 20 = 97,5.$$

Розрахункові втрати теплоти в навколишнє середовище, кДж/кг

$$q_5^P = k \cdot F \cdot \Delta t \cdot 3,6 / W = 3,5 \cdot 24,5 \cdot 97,5 \cdot 3,6 / 110 = 276.$$

Оскільки значення $q_5^P < q_5$ і відрізняються між собою менше як на 5%, розрахунки можна не уточнювати.

Коефіцієнти аеродинамічного опору (air.resistance) в трубі:
– по довжині труби однофазного потоку

$$\xi_0 = \lambda H / D = 0,0161 \cdot 11,1 / 0,7 = 0,256,$$

де $\lambda = 0,0052 + 0,5(15,4 \cdot 10^4)^{-0,32} = 0,0161$;
– коефіцієнт статичних втрат напору

$$\xi_{ст} = 2 \cdot 0,244 \cdot 0,086 = 0,042,$$

де $Fr = gD / \omega_r^2 = 9,81 \cdot 0,7 / 5,3^2 = 0,244$;
– коефіцієнт втрат на розгінній ділянці

$$\xi_p = 2 \cdot 0,086 [0,95(1 - 2,65/5,3) - 0,8 \cdot 15,3] = 0,07;$$

– сумарний коефіцієнт місцевих втрат для частинок

$$\xi_{вт} = 1 \cdot 0,086 = 0,086;$$

– загальний коефіцієнт опору

$$\xi_3 = 0,256 + 0,42 + 0,07 + 1 + 0,086 = 1,454;$$

– втрати напору в трубі-сушарці, Па

$$\Delta P_{\text{тс}} = 0,5 \xi_3 \cdot \rho_{\text{см}} w_{\text{т}}^2 = 0,5 \cdot 1,454 \cdot 0,9 \cdot 5,3^2 = 18,4.$$

Приймаємо втрати напору в циклоні $\Delta P_{\text{ц}} = 600$ Па; у мультициклоні $\Delta P_{\text{мц}} = 500$ Па і у фільтрі $\Delta P_{\text{ф}} = 100$ Па [8].

Загальні втрати напору в сушильній установці, Па

$$\Delta P_{\text{у}} = 18,4 + 600 + 500 + 100 = 1218,4.$$

Розрахунковий напір вентилятора, Па

$$H_{\text{в}} = 1,1 \Delta P_{\text{у}} = 1,1 \cdot 1218,4 = 1340.$$

Необхідна потужність привода вентилятора, Вт

$$N_{\text{в}} = G_{\text{см}} H_{\text{в}} / (3600 \cdot \rho_{\text{см}} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{пр}}) = 6600 \cdot 1340 / (3600 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot 0,98) = 3940.$$

Питома витрата електроенергії, кВт/кг

$$q_e = N_{\text{в}} \cdot 10^{-3} / W = 3940 \cdot 10^{-3} / 110 = 0,0358.$$

Питома витрата теплоти на випаровування, кДж/(кг·К)

$$q = l (h_1 - h_0) = 60(148 - 6) = 8520.$$

Загальна питома потужність, кВт/кг

$$q_3 = q/3600 + q_e = 8520/3600 + 0,0358 = 2,4.$$

8.3 Розрахунки вихрових сушарок

8.3.1 Основні розрахункові залежності

Використання закручених потоків дозволяє в кілька разів збільшити середню відносну швидкість фаз і концентрацію висушуваного матеріалу в апараті, крім того, висока концентрація дисперсної фази збільшує поверхню контакту фаз. Слід відзначити також, що сушарки із закрученим потоком мають високі значення аеродинамічних втрат.

Сушарка (вихрова камера) (vortex chamber) являє собою циліндричну камеру дискового типу, ширина якої дорівнює 0,3...0,4 діаметра труби (рис. 8.5). На боковій стінці корпуса сушарки 1 розташовано патрубок 2 за допомогою якого надходить дисперсний матеріал. Нагрітий сушильний агент нагнітається в патрубок 3 звідки через тангенціальні зазори, утворені напрямними пластинами 4 з великою швидкістю надходить у камеру. Знизу камера закрита кришкою з люком. В центральній частині торцевої стінки апарата є отвір 5, до якого примикає завитка 6 для виходу газозавіси. При вході в камеру дисперсна фаза відкидається до стінок касети і утягується в обертальний рух, внаслідок чого біля стінок утворюється кільцевий обертальний шар. Середня тривалість перебування матеріалу в сушильній камері може змінюватись від 10 с до кількох хвилин.

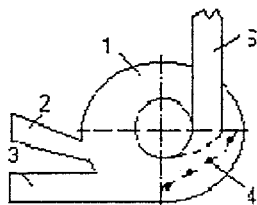


Рисунок 8.5 – Схема вихрової сушарки

Конструкції вихрових сушарок наведені в [8, 9].

Критична швидкість витікання сушильного агента в камеру визначається з емпіричної залежності [5].

$$Re = v_{кр} \Sigma h / v_{см} = 0,29(D/\Sigma h)^{-0,64} (D/d_0)^{1,3} Ar^{0,5}, \quad (8.45)$$

де D – діаметр вихрової камери, м;

Σh – сумарна висота тангенціальних каналів на вході в камеру, м.

Швидкість газу w_r на вході в сушарку приймається рівною

$$w_r = (1,5 \dots 2,5) v_{кр}.$$

Утримувальна здатність камери при критичній швидкості витікання, кг

$$G_{кр} = A \cdot 10^{-3} E_{кр} D^{-0,55} n^{0,15}, \quad (8.46)$$

де A – коефіцієнт ($A = 1,5$ для легкоосипких і $A = 3$ для важкоосипких матеріалів);

n – кількість тангенціальних підходів ($n = 1 \dots 2$ для грубодисперсних і $n = 3 \dots 5$ для дрібнодисперсних матеріалів);

$E_{кр} = 0,5 G_{см} (1 + d_0) v_{кр}^2$ – кінетична енергія в тангенціальному підводі.

Утримувальна здатність камери при швидкості сушильного агента,

$$G = G_{кр}(1 + Bw_*^{2,6})\mu_*^{0,55} \quad (8.47)$$

де B – коефіцієнт ($B = 0,7 \dots 0,9$ для частинок, форма яких значно відрізняється від сфери);

μ_* – витратна концентрація дисперсної фази; $w_* = v_{кр}/\omega_r$.

Критична швидкість газу в тангенціальному каналі визначається з рівняння, м/с

$$v_{кр}^k = 0,29Ar(D/d_e)^{0,3}(D/\sum h)^{0,36}v_{cm}/d_e \quad (8.48)$$

Рівняння міжфазного теплообміну

$$Nu = 0,047ReAr^{-0,1}(d_e/D)^{0,3}(\sum h/D)^{0,15}(G_{кр}/G)^{0,6}, \quad (8.49)$$

за $w_r \geq v_{кр}^k$

$$Nu = 0,019Re^{0,25}Ar^{0,35}(d_e/D)^{0,1}(\sum h/D)^{-0,1}, \quad (8.50)$$

за $w_r < v_{кр}^k$.

Температурний потенціал процесу сушіння, °С

$$\Delta t = t_2 - t_{м2}. \quad (8.51)$$

Аеродинамічний опір вихрової сушарки, Па

$$\Delta P_c = \xi_c \rho w_r^2 / 2, \quad (8.52)$$

де коефіцієнт опору сушильної камери визначається за формулою

$$\xi_c = (1 + 0,6\mu_*)(b/D)^{0,35}(D_0/D)^{-0,2}[90(\sum h/D) + 4,4\exp(-4,6 \cdot D)], \quad (8.53)$$

де b – ширина камери, м;

D_0 – діаметр вихідного отвору, м.

Приклад 8.3

За даними прикладу 8.2 розрахувати вихрову сушарку. Температуру навколишнього повітря прийняти $t_0 = 15$ °С, а температуру повітря на вході в сушарку $t_1 = 145$ °С.

Розрахунок

З побудови на h - d діаграмі процесу нагрівання повітря (лінія 0-1) визначаємо: $h_0 = 35$ кДж/кг; $d_0 = 0,008$ кг/кг; $h_1 = 167$ кДж/кг.

Температура відпрацьованого в сушарці повітря, °С

$$t_r = t_m + 20 = 60 + 20 = 80.$$

Кількість випаруваної вологи, кг/с

$$W = 110/3600 = 0,031,$$

де значення W див. прикл. 8.2.

Питомі втрати теплоти, кДж/кг; $q_m = 305$; $q_{zm} = 25$ визначені у прикл. 8.2, значення $q_5 = 20$ приймаємо з подальшим уточненням.

Величина теплових втрат, кДж/кг

$$\Delta = C_{втм} - (q_m + q_{zv} + q_5) = 4,187 \cdot 20 - (305 + 25 + 20) = -266,2.$$

Побудувавши на h - d діаграмі процес сушіння, визначаємо кінцевий вологовміст повітря $d_2 = 0,0264$ кг/кг.

Питома витрата теплоти в сушарці, кДж/кг

$$Q = (h_1 - h_0)/(d_2 - d_0) = (167 - 35)/(0,0264 - 0,008) = 7174.$$

Загальна витрата теплоти, кВт

$$Q = q \cdot W = 7174 \cdot 0,031 = 222,4.$$

Питома витрата повітря, кг/кг

$$\ell = 1/(d_2 - d_0) = 1/(0,0264 - 0,008) = 54,3.$$

Загальна витрата вологого повітря, кг/с

$$G_{cm} = \ell \cdot W = 54,3 \cdot 0,031 = 1,68.$$

Середня температура матеріалу і середній вологовміст повітря

$$\begin{aligned} \bar{t}_m &= 0,5(t_{m1} + t_{m2}) = 0,5(20 + 60) = 40 \text{ }^\circ\text{C}, \\ d_{cp} &= 0,5(d_0 + d_2) = 0,5(0,008 + 0,0264) = 0,0172. \end{aligned}$$

Параметри повітря, обчислені за (8.10)...(8.13)

$$\rho_{\text{см}} = 0,83 \text{ кг/м}^3; C_{\text{см}} = 1,03 \text{ кДж/кг К}; v_{\text{см}} = 27,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{\text{см}} = 2,72 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м·К)}; Pr_{\text{см}} = 0,77.$$

Об'ємна густина матеріалу і густина його на вході в сушарку, кг/м³

$$\rho_v = \rho_m(1 + \omega_2) = 1450(1 + 0,03) = 1408,$$

$$\rho_{m1} = \rho_v(1 + \omega_1) = 1408 \cdot (1 + 0,25) = 1760.$$

Згідно з рекомендаціями [8] приймаємо вихрову камеру діаметром $D = 0,8$ м, з діаметром отвору $D_0 = 0,32$ м; $D_0/D = 0,4$, сумарною висотою тангенціальних каналів $\sum h = 0,9$ м; $\sum h/D = 0,112$ і кількістю підводів $n = 3$.
Значення критерію Архімеда

$$Ar = 9,81(1760 - 0,83)(0,5 \cdot 10^{-3})^3 / 0,83(27,3 \cdot 10^{-6})^3 = 3420.$$

Критичний критерій Рейнольдса і критична швидкість витікання газу, м/с

$$Re = 0,29 (\sum h / D)^{0,64} (D / d_e)^{1,3} Ar^{0,6} =$$

$$= 0,29 \cdot 0,112^{0,64} (0,8 / 0,5 \cdot 10^{-3})^{1,3} 3420^{0,6} = 14 \cdot 10^4,$$

$$v_{\text{кр}} = 14 \cdot 10^4 \cdot 27,3 \cdot 10^{-6} / 0,09 = 42.$$

Приймаємо швидкість газу на вході, м/с

$$W_1 = 1,9v_{\text{кр}} = 1,9 \cdot 42 = 80.$$

Ширина камери за [8], м

$$b = G_{\text{см}}(1 + d_0) / (\rho_{\text{см}} W_1 \sum h) = 1,68(1 + 0,008) / (0,83 \cdot 80 \cdot 0,09) = 0,283.$$

Відношення $b/D = 0,283/0,8 = 0,354$ в межах оптимальних значень (0,3...0,4).

Витратна концентрація матеріалу, кг/кг

$$\mu_{\text{ч}} = 0,5(0,174 + 0,143) / [1,68(1 + 0,0172)] = 0,093,$$

де значення G_1 і G_2 визначені в прикладі 8.2.

Приймаємо товщину стінки труби $\delta_{\text{ст}} = 3$ мм; товщину азбестової ізоляції $\delta_i = 25$ мм, температуру зовнішньої стінки труби $t_{\text{зн}} = 40$ °С; температуру в приміщенні $t_{\text{пр}} = 15$ °С. Аналогічно до розрахунків у попередньому прикладі знаходимо

$$\alpha_1 = 160 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}; \alpha_2 = 10 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}; k = 4,4 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}.$$

Поверхня теплообміну частинок, м²

$$F = Pd(b + D/2) = 3,14 \cdot 0,8 \cdot (0,283 + 0,5/0,8) = 1,71.$$

Розрахункові втрати теплоти в навколишнє середовище, кДж/кг

$$q_5^p = kF \cdot 10^{-3} [0,5(t_1 + t_2) - t_{np}] / W = 4,4 \cdot 1,71 \cdot 10^{-3} \times \\ \times [0,5(145 + 80) - 15] / 0,031 = 23,5.$$

Оскільки $q_5^p < q_5$, а різниця між ними не перевищує 3%, то розрахунки можна не уточнювати.

Кінетична енергія газів при критичній швидкості витікання, Вт

$$E_{кр} = G_{см}(1 + d_0) v_{кр}^2 / 2 = 1,68 \cdot (1 + 0,008) 42^2 / 2 = 1494.$$

Утримувальна здатність камери при критичній швидкості, кг

$$G_{кр} = A \cdot 10^{-3} E_{кр} \cdot D^{-0,55} n^{0,15} = 2,65 \cdot 10^{-3} \cdot 1494 \cdot 0,8^{-0,55} 3^{0,15} = 5,3.$$

Утримувальна здатність камери при робочій швидкості, кг

$$G_p = G_{кр} [1 + 0,9(v_{кр}/W_1)^{2,5} \cdot \mu_{т, 0,55}(v_{кр}/W_1) = \\ = 5,3 \cdot [1 + 0,9(42/80)^{2,5} \cdot 0,093^{0,55(42/80)}] = 5,8.$$

Тривалість перебування матеріалу в сушарці, с

$$\tau = 2G_p / (G_1 + G_2) = 2 \cdot 5,8 / (0,174 + 0,143) = 36,6.$$

Критерій Рейнольдса в тангенціальному каналі

$$Re_{кр}^k = 0,29(D/\Sigma h)^{0,36} (D/d_e)^{0,33} Ar^{0,6} = \\ = 0,29 \cdot (0,8/0,09)^{0,36} \cdot (0,8/[10,5 \cdot 10^{-3}])^{0,33} \cdot 3420^{0,6} = 770.$$

Критерій Рейнольдса за швидкістю в сушарці

$$Re_c = W_1 \cdot d_e / v_{см} = 80 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} / (27,3 \cdot 10^{-6}) = 1476.$$

Оскільки $Re_c > Re_{кр}^k$, то критерій Нуссельта для міжфазного теплообміну визначається за формулою

$$Nu = 0,047 Ar^{-0,1} (d_e/D)^{0,33} (\Sigma h/D)^{0,15} Re(G_p/G_{кр})^{-0,6},$$

$$Nu = 0,047 \cdot 3420^{-0,1} (0,5 \cdot 10^{-3}/0,8)^{0,33} \cdot 0,112^{0,15} \cdot (5,8/5,3)^{-0,6} \cdot 1476 = 2,1.$$

Звідки коефіцієнт міжфазного теплообміну, Вт/(м²·К)

$$\alpha = Nu \cdot \lambda_{см}/d_e = 2,1 \cdot 2,72 \cdot 10^{-2} / 0,5 \cdot 10^{-3} = 115.$$

Питома поверхня частинок $S = 14400$ визначена у прикладі 8.2.
 Питома витрата повітря, кг/кг

$$g_{cm} = G_{cm} \cdot 3600 / G_m = 1,68 \cdot 3600 / 500 = 12,1.$$

Тривалість сушіння матеріалу, с

$$\begin{aligned} \tau_c &= g_{cm} \cdot C_{cm} \cdot \rho_{cm} \cdot 10^{-3} (t_1 - t_2) [\alpha \cdot S (t_2 - t_{m2})]^{-1} = \\ &= 12,1 \cdot 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot 1408 (145 - 80) [115 \cdot 14400 (80 - 60)]^{-1} = 33,4. \end{aligned}$$

Отже, тривалість сушіння менше тривалості перебування матеріалу в сушарці ($\tau_c < \tau$), а це означає, що забезпечується задана кінцева вологість матеріалу і розрахунки можна не уточнювати.

Коефіцієнт аеродинамічного опору вихрової камери

$$\begin{aligned} \xi_c &= (1 + 0,6 \cdot 0,093) \cdot 0,354^{0,35} \cdot 0,32 [90 \cdot (0,112)]^{1,7} + \\ &+ 4,4 \exp(-4,6 \cdot 0,8)] = 2,11. \end{aligned}$$

Приймаємо коефіцієнт місцевих втрат $\xi_m = 1,5$.

Гідралічний опір вихрової камери, Па

$$\Delta P_x = (\xi_c + \xi_m) \cdot \rho_{cm} W_1^2 / 2 = (2,11 + 1,5) \cdot 0,83 \cdot 80^2 / 2 = 9588.$$

Загальні втрати напору в сушильній установці, необхідна потужність повітрорудки та техніко-економічні показники сушарки визначаються так само, як у попередньому прикладі.

8.4 Розрахунки сушарок з киплячим шаром

8.4.1 Основні розрахункові залежності

За конструктивним принципом сушарки з киплячим шаром поділяються на дві групи: одно- і багатосекційні. Односекційні сушарки найбільш прості в конструктивному і експлуатаційному відношеннях, мають високі економічні показники, легко автоматизуються, завдяки чому є найбільш поширеним типом сушарок. До недоліків таких апаратів треба віднести нерівномірність сушки, яка обумовлена неоднаковим часом перебування дисперсного матеріалу в робочій зоні сушарки. Сушильним агентом можуть бути як повітря, так і димові гази.

Конструкції сушарок з киплячим шаром наведені в [5,8]. Установка складається з циліндричної камери, в яку із бункера за допомогою живильника безперервно надходить дисперсний матеріал. Підігріте в калорифері повітря або топкові гази нагнітаються вентилятором або повітрорудкою під опорну решітку апарата, де створюється "киплячий" шар матеріалу. Висушений матеріал видаляється через патрубок, розташований безпосе-

редньо над решіткою з боку, протилежному навантаженню. Відпрацьовані газу надходять в циклон для очищення, а кінцеве очищення здійснюється в рукавному фільтрі.

Критерій Рейнольдса для пневмозрідження сферичних частинок

$$Re_0 = Ar / (1400 + 5,22Ar^{0,5}). \quad (8.54)$$

Швидкість початку пневмозрідження, м/с
сферичних частинок

$$v_0 = Re_0 \cdot v_{cm} / d_c, \quad (8.55)$$

частинок довільної форми

$$v_0 = v_0 / \Phi^{0,5}. \quad (8.56)$$

Зв'язок між швидкістю газу в сушарці та пористістю ϵ встановлюється співвідношеннями

$$\epsilon = Ar^{0,21} / (18Re + 0,36Re^2)^{0,21}, \quad (8.57)$$

$$Re = W_r \cdot d_c / v_{cm} = Ar \cdot \epsilon^{4,75} [18 + 0,61Ar^{0,5} \cdot \epsilon^{2,375}]^{-1}, \quad (8.58)$$

значення ϵ і W_r лежать у межах $\epsilon = 0,65 \dots 0,75$; $W_r = (2 \dots 6)v_0$.

Коефіцієнт міжфазного теплообміну α між газом і висушуваним матеріалом визначається з критеріальних рівнянь

$$Nu = 0,016(Re/\epsilon)^{1,3} Pr_{cm}^{0,33}; (Re/\epsilon \leq 200), \quad (8.59)$$

$$Nu = 0,4(Re/\epsilon)^{0,67} Pr_{cm}^{0,33}; (Re/\epsilon > 200). \quad (8.60)$$

Температурний потенціал сушіння, °C

$$\Delta t = (t_1 - t_2) \cdot [\ln(t_1 - t_{m2}) / (t_2 - t_{m2})]^{-1}. \quad (8.61)$$

Температуру матеріалу в шарі t_{m2} можна вважати практично сталою

$$t_m = t_2 - (3 \dots 5) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Сумарна поверхня усіх частинок матеріалу в апараті, м²

$$F = G_{cm} C_{cm} (t_1 - t_2) / (\alpha \cdot \Delta t). \quad (8.62)$$

Маса матеріалу, який однозначно перебуває в сушарці, кг

$$G_M^c = \rho_M \cdot d_c \cdot F/6. \quad (8.63)$$

Тривалість сушіння, с

$$\tau = 2G_M^c / (G_1 + G_2), \quad (8.64)$$

(для визначення G_1 і G_2 див. приклад 8.2).

Висота киплячого шару, м

$$h = 80 \cdot d_0, \quad (8.65)$$

де діаметр отвору решітки $d_0 = 3 \dots 6$ мм.

Загальна висота апарату над решіткою

$$H = 5h = 400 \cdot d_0. \quad (8.66)$$

Гідралічний опір киплячого шару, Па

$$\Delta P_{ш} = \rho_M \cdot g \cdot h \cdot (1 - \varepsilon), \quad (8.67)$$

Гідралічний опір решітки, Па

$$\Delta P_p = \Psi \cdot \Delta P_{ш}, \quad (8.68)$$

де $\Psi = 0,6 \dots 0,8$.

Швидкість газу в отворах решітки, м/с

$$U_{от} = [2 \cdot \Delta P_p / (\rho_{см1} \cdot \xi_{р})]^{0,5}, \quad (8.69)$$

де $\rho_{см1}$ – густина газу на вході в решітку;

$\xi_{р} = 2$ – коефіцієнт опору решітки.

Живий переріз опорної решітки, м²

$$f_{ж} = \rho_{см2} \cdot W_{г} / (U_{от} \cdot \rho_{см1}), \quad (8.70)$$

де $\rho_{см2}$ – густина газу на виході з сушарки.

Приклад 8.4

Розрахувати однокамерну сушарку з киплячим шаром за даними: видавність сухого матеріалу $G_M = 1000$ кг/год, якщо вологість матеріалу: початкова $\omega_1 = 0,12$; кінцева $\omega_2 = 0,006$; критична $\omega_{кр} = 0,03$; середній розмір частинок $d_s = 3$ мм; мінімальний розмір частинок $d_{min} = 2,1$ мм; фактор форми $f = 1,25$; теплоємність сухого матеріалу $C_M = 1,4$ кДж/(кг·К); густина сухо-го матеріалу $\rho_M = 1200$ кг/м³; початкова і кінцева температура матеріалу

$t_{m1} = 20^{\circ}\text{C}$; $t_{m2} = 50^{\circ}\text{C}$; параметри повітря (на вході в калорифер): $t_0 = -7^{\circ}\text{C}$;
 $d_0 = 0,002 \text{ кг/кг}$; температура повітря на вході в сушарку $t_1 = 120^{\circ}\text{C}$.

Розрахунок

З h-d діаграми визначаємо параметри сушильного агента

$$h_0 = -2 \text{ кДж/кг}; h_1 = 112 \text{ кДж/кг}.$$

З матеріального балансу сушарки знаходимо

$$G_1 = G_m(1 + \omega_1) = 1000(1 + 0,12) = 1120 \text{ кг/год},$$

$$G_2 = G_m(1 + \omega_2) = 1000(1 + 0,005) = 1005 \text{ кг/год},$$

$$W = G_1 - G_2 = 1120 - 1005 = 115 \text{ кг/год}.$$

Питомі втрати теплоти в камері, кДж/кг:

– на нагрів матеріалу

$$q_m = 1000(1,4 + 4,18 \cdot 0,005)(50 - 20) = 370,6,$$

– на видалення зв'язаної вологи

$$q_{зв} = 0,5 \cdot 4187(0,03 - 0,005)^2 (0,12 - 0,005) = 11,4.$$

Втрати в навколишнє середовище приймаємо $q_5 = 10\%$ з подальшим уточненням.

Сумарні теплові втрати, кДж/кг

$$\Delta = 4,18 \cdot 20 - (370,6 + 11,4 + 10) = -308,5.$$

Приймаючи температуру повітря на виході з сушарки

$$t_2 = t_m^* + 5^{\circ}\text{C} = 50 + 5 = 55^{\circ}\text{C},$$

визначаємо точку 2 на діагоналі, звідки знаходимо

$$h_2 = 112 \text{ кДж/кг} \quad d_2 = 0,0217 \text{ кг/кг}.$$

Витрати повітря: питома, кг/кг і загальна кг/год

$$\ell = 1/(0,217 - 0,002) = 50,8,$$

$$G_{см} = 50,8 \cdot 115 = 5842.$$

Фізичні властивості повітря, визначені за (8.10)...(8.13) при кінцевих параметрах

$$\begin{aligned}\rho_{\text{см}} &= 1,04 \text{ кг/м}^3; \nu_{\text{см}} = 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; C_{\text{см}} = 1,01 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); \\ \lambda_{\text{см}} &= 2,87 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}); a_{\text{см}} = 26 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \\ Pr_{\text{см}} &= \nu_{\text{см}}/a_{\text{см}} = 18,5 \cdot 10^{-6}/(26 \cdot 10^{-6}) = 0,71.\end{aligned}$$

Критерії Архімеда і Рейнольдса

$$Ar = (1200 - 1,04) \cdot 9,81 (3 \cdot 10^{-3})^3 / 1,04 \cdot (18,5 \cdot 10^{-6})^2 = 893000.$$

$$\begin{aligned}Re &= Ar \cdot \varepsilon^{4,75} / (18 + 0,61 Ar^{0,5}) \varepsilon^{2,375} = \\ &= 893 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7^{4,75} / (18 + 0,61 \cdot 893 \cdot 10^3)^{0,5} \cdot 0,7^{2,375} = 615.\end{aligned}$$

Швидкість повітря в сушарці, м/с

$$W_{\text{см}} = 614 \cdot 18,5 \cdot 10^{-6} / (3 \cdot 10^{-3}) = 3,8.$$

Критерій Нуссельта і коефіцієнт міжфазного теплообміну, Вт/(м²·К)

$$Nu = 0,4 (Re/\varepsilon)^{0,67} \cdot Pr^{0,33} = 0,4 \cdot (614/0,7)^{0,67} \cdot 0,71^{0,33} = 33,$$

$$\alpha_{\text{см}} = 33 \cdot 2,87 \cdot 10^{-2} / (3 \cdot 10^{-3}) = 318.$$

Температурний потенціал процесу сушіння, °С

$$\Delta t = (120 - 55) / [\ln(120 - 50) / (55 - 50)]^{-1} = 24,6.$$

Сумарна поверхня частинок в сушарці, м²

$$F = 5807 \cdot 1,01 \cdot 10^3 (120 - 55) / (3600 \cdot 318 \cdot 24,6) = 13,5.$$

Тривалість сушіння, с

$$\tau = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1200 \cdot 13,5 \cdot 3600 / [3 \cdot (1120 - 1005)] = 36.$$

Об'ємна витрата повітря на виході з сушильної камери, м³/с

$$V_{\text{см}} = G_{\text{см}} (1 + a_2) / (3600 \cdot \rho_{\text{см}}) = 5807 (1 + 0,0217) / (1,04 \cdot 3600) = 1,6.$$

Діаметр розподільної решітки, м

$$D_p = [4V_{\text{см}} / (\pi W_{\text{см}})]^{0,5} = 1,128 (1,6/3,8)^{0,5} = 0,72.$$

Приймаємо розподільну решітку з діаметром отворів $d_0 = 4$ мм.

Тоді висота киплячого шару, висота сепараційного простору і загальна висота камери, м

$$h = 80 \cdot d_0 \cdot 10^{-3} = 80 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,32;$$

$$h_{\text{сер}} = 4 \cdot h = 4 \cdot 0,32 = 1,28,$$

$$h_3 = h + h_{\text{сер}} = 5 + 0,32 = 1,6.$$

Розрахуємо втрати теплоти в навколишнє середовище. Приймаємо товщину стінки апарата $\delta_{\text{ст}} = 3$ мм, товщину азбестової ізоляції 20 мм, температуру зовнішньої поверхні $t_{\text{зн}} = 40^\circ\text{C}$, температуру в приміщенні $t_{\text{пр}} = 20^\circ\text{C}$.

Розрахунки за методикою прикладу 8.2 дають

$$\alpha_1 = 153 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}); \alpha_2 = 11,84 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}); k = 11 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}).$$

Поверхня теплообміну сушильної камери, м^2

$$F_k = \pi \cdot D \cdot h = 3,14 \cdot 0,72 \cdot 0,32 = 0,72.$$

Середній температурний напір, $^\circ\text{C}$

$$\Delta t_{\text{ср}} = (50 - 20) = 30.$$

Питома втрата теплоти, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$q_5^{\text{P}} = k \cdot F_k \cdot \Delta t_{\text{ср}} \cdot 3600/W = 11 \cdot 30 \cdot 0,72 \cdot 3600/115 = 8,8.$$

Оскільки $q_5^{\text{P}} < q_5$ розрахунки можна не уточнювати.

Швидкість витання частинок, $\text{м}/\text{с}$ за (8.11) і (8.12)

$$V_{\text{в}} = 893 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-6} / [18 + 0,61(893 \cdot 10^3)^{0,5} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,55^{0,5}] = 5,$$

де $\Phi = 1,25^{0,9} \cdot 614^{0,15(1,25-1)^{0,5}} = 1,55$.

Дійсна швидкість газу в сепараційному просторі, $\text{м}/\text{с}$

$$W_{\text{в}} = 4(G_{\text{см}} + W) / (\rho_{\text{см}} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot 3600) = \\ = 4(5807 + 115) / (1,04 \cdot 3,14 \cdot 0,72^2 \cdot 3600) = 3,9.$$

Отже, $W_{\text{в}} < V_{\text{в}}$, тобто апарат забезпечує осадження в сепараційному просторі висушеного матеріалу. У випадках $W_{\text{в}} > V_{\text{в}}$ необхідно збільшити переріз сепараційного простору.

Гідрравлічний опір кишлячого шару, Па

$$\Delta P_{\text{ш}} = 1200 \cdot 9,81 \cdot 0,32 \cdot (1 - 0,7) = 1130.$$

Гідрравлічний опір решітки, Па

$$\Delta P_p = 0,7 \cdot 1130 = 791.$$

Швидкість газу в отворах решітки, м/с

$$U_{от} = 2791 / (1,04 \cdot 2) = 28.$$

Живий переріз опірної решітки, м²

$$f_{ж} = 3,8 \cdot 1,04 / (28 \cdot 1,01) = 0,135.$$

Кількість отворів в решітці

$$n = f_{ж} / (0,785 d_0^2) = 0,135 / (0,785 \cdot 0,004^2) = 10756.$$

Загальні втрати напору в сушильній установці

$$\Delta P_3 = \Delta P_{ш} + \Delta P_p + \Delta P_{ц} + \Delta P_{ф} = 1130 + 791 + 600 + 100 = 2621,$$

де втрати напору в циклоні $\Delta P_{ц}$ і в рукавному фільтрі визначаються аналогічно, як і в прикладі 8.2.

За даними ΔP_3 вибирають вентилятор або повітродувку, питомі витрати електроенергії, теплоти і загальну питому потужність установки.

8.5 Розрахунки барабаних сушарок

8.5.1 Основні розрахункові залежності

Барабанні сушарки (drum driers) використовуються в багатотонажних виробництвах, оскільки мають велику продуктивність, надійність і економічність.

Основним вузлом таких сушарок є барабан, який обертається від електродвигуна з частотою обертання $n = 8 \dots 12$ об/хв. Барабан має нахил у 3..4 градуси в бік вивантаження матеріалу. Вологий матеріал і сушильний агент надходять в барабан з одного боку і рухаються прямоструминно. Для збільшення поверхні теплообміну і коефіцієнта тепловіддачі всередині барабана установлюють насадку у вигляді лопаток, секторів або їх комбінації. Лопатки насадки захоплюють із нижньої частини барабана матеріал і підіймають його у верхню частину. Матеріал падає вниз, добре перемішується і подрібнюється. При цьому збільшується його поверхня зіткнення з сушильним агентом. Компонування барабаних сушарок, конструкції барабанів і насадок вказані в [8, 9].

Для сушіння термостійких матеріалів в нехарчовій промисловості використовують топкові гази, що інтенсифікує процеси сушіння і підвищує економічність сушарок, оскільки з підвищенням температури газів їх вологопоглинаюча здатність збільшується. Температура сушильного агента вибирається в залежності від властивостей висушуваного матеріалу і досяга-

ється за рахунок зайвого повітря, яке нагнітається в топку вентилятором. Характеристики сушильного агента визначаються за формулами, наведеними в п. 8.1.

Внутрішній діаметр барабана, м

$$D_{\text{вн}} = \{4G_{\text{см}}[\pi(1 - \varphi)w_{\text{г}}'']^{-1}\}^{0,5} \cdot [R_{\text{с}}T_2(A + d_0M_{\text{с}}/M_{\text{п}})/P_6]^{0,5}, \quad (8.71)$$

де T_2 , К, d_0 , кг/кг – абсолютна температура і вологовміст сушильного агента на виході з сушарки;

$R_{\text{с}}$, $M_{\text{с}}$ – відповідно газова стала і молекулярна маса сушильного агента;

$G_{\text{см}}$ – витрата сушильного агента, кг/с;

P_6 – барометричний тиск в сушарці, Па;

$M_{\text{п}} = 18$ кг/моль – молекулярна маса водяної пари;

A – коефіцієнт впливу зайвого повітря (для випадків сушіння димовими газами), який визначається з табл. 8.1;

$w_{\text{г}}''$ – припустима швидкість газів на виході з сушарки, м/с, яка визначається з додатка Ж;

φ – коефіцієнт заповнення барабана (додаток И).

Таблиця 8.1 – Значення коефіцієнта впливу зайвого повітря

α	1	1,5	2	2,5	3	3,5	3,5
A	0,93	0,95	0,963	0,973	0,981	0,986	1

Коефіцієнт тепловіддачі до частинок матеріалу, що падають з насадки барабана, Вт/(м²·К)

$$\alpha_v' = 0,78a^{0,2}\beta^{0,8}z \cdot h_{\text{ср}}^{1,1}\lambda_{\text{см}}\rho_*^2U^{0,6}/(d_e^{0,7}D_{\text{вн}}) \times \{a/B + h_{\text{ср}}\text{tg}[3,75 + 0,316(\rho_{\text{см}}w_{\text{ср}}^2)]^{0,8}\}, \quad (8.72)$$

де $a = F_{\text{м}}n$; $\rho_* = \rho_{\text{г}}/\rho_{\text{м}}$; $u = (w_{\text{ср}}/v_{\text{см}})$;

$w_{\text{ср}} = (w_{\text{г}}^2 + 2,2h_{\text{ср}})^{1/2}$; $B = \beta[0,75gS_{\text{м}}\sin(\gamma)]^{0,5}$;

$\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{м}}$ – уявна і реальна густина матеріалу, відповідно;

$\rho_{\text{см}}$, $v_{\text{см}}$, $\lambda_{\text{см}}$ – густина, в'язкість і теплопровідність сушильного агента при середній температурі;

$w_{\text{ср}}$ – середня припустима швидкість сушильного агента;

$F_{\text{м}}$, $S_{\text{м}}$, β , $h_{\text{ср}}$ – характеристики ефективності роботи насадки за даними додатку К;

z – кількість лопаток насадки;

n – кількість обертів барабана;

γ – кут нахилу барабана.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, в насадці і у нижній частині барабана, Вт/(м²·К)

$$\alpha_v'' = 0,343 \lambda_{cm} z^{1/3} Re_m^{0,66} / D_{вн}^2, \quad (8.73)$$

де $Re_m = w_{cp} S_m / \nu_{cm}$.

Коефіцієнт тепловіддачі до матеріалу за рахунок контакту з поверхнями барабана і насадки, Вт/(м²·К)

$$\alpha_v''' = [6,5 + 4,46(\rho_{cm} w_{cp})] S_{ог} / D_{вн}^2, \quad (8.74)$$

де $S_{ог}$ — характеристика насадки з додатка И;

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до одиниці об'єму барабана, Вт/(м²·К)

$$\alpha_v = \alpha_v' + \alpha_v'' + \alpha_v''', \quad (8.75)$$

Середній температурний напір, °С

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_{\delta} - \Delta t_m) / \ln(\Delta t_{\delta} / \Delta t_m), \quad (8.76)$$

де $\Delta t_{\delta} = t_1 - t_{m1}$; $\Delta t_m = t_2 - t_{m2}$; t_1, t_2, t_{m1}, t_{m2} — відповідно початкова і кінцева температури сушильного агента і матеріалу.

Необхідний об'єм барабана, м³

$$V_6 = 1,2 \cdot Q / \alpha_v \Delta t_{cp}, \quad (8.77)$$

де $Q = Q_m + Q_w$, Вт — теплова потужність, яка витрачається на нагрівання матеріалу і випаровування вологи.

Довжина барабана, м

$$L_6 = V_6 / (0,785 D_{вн}^2). \quad (8.78)$$

Тривалість перебування частинок матеріалу в барабані сушарки можна визначити за емпіричною формулою, хв.

$$\tau = L_6 [D_{вн} \Pi^{0,7} (0,43 t_{gr} + 0,011 w_r^{1,3}) / (\rho_{cm} d_e)]^{-1}, \quad (8.79)$$

де значення d_e підставляються в мм.

Розрахунковий коефіцієнт заповнення барабана

$$\varphi^p = 0,5 (G_1 + G_2) \tau / (60 \rho_{cm} V_6), \quad (8.80)$$

Якщо $\varphi^p / \varphi < 0,84$ або $\varphi^p / \varphi > 1,14$ розрахунки уточнюють при новому значенні φ .

Потужність привода барабана, кВт

$$N_6 = 0,013 \cdot 10^{-3} \cdot L_6 \cdot V_6 \rho_{\gamma} \cdot \pi / (\eta_m \cdot \eta_{\text{пр}}), \quad (8.81)$$

де $\eta_m = 0,95$; $\eta_{\text{пр}} = 0,98$ – механічний і електричний ККД передачі та привода.

Приклад 8.5

Розрахувати барабанну сушарку за такими даними: продуктивність за сухим матеріалом $G_m = 6000$ кг/год; вологість матеріалу: $w_1 = 0,1$; $w_2 = 0,005$; еквівалентний діаметр частинок $d_e = 1,2$ мм; густина матеріалу $\rho_m = 1640$ кг/м³; теплоємність матеріалу $C_m = 0,85$ кДж/(кг·К); температури висушуваного матеріалу: $t_{m1} = 20$ °С; $t_{m2} = 80$ °С. Сушильним агентом є суміш димових газів і повітря. Температури сушильного агента: $t_1 = 20$ °С, $t_2 = 120$ °С. Параметри навколишнього повітря: $t_0 = 20$ °С; $\phi_0 = 70$ %. Склад природного газу, який спалюється в топці: $\text{CH}_4 = 92$ %; $\text{H}_2 = 4$ %; $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,4$ %; $\text{CO}_2 = 0,4$ %; $\text{CO} = 1,2$ %; $\text{N}_2 = 1,6$ %. Теплота згорання газу $Q_{\text{в}}^{\text{р}} = 53$ МДж/кг. Теплоємність палива і продуктів згорання прийняти рівною теплоємності повітря.

Розрахунок

Ентальпія і вологовміст навколишнього повітря, визначені з h-d діаграми: $h_0 = 45$ кДж/кг; $d_0 = 0,009$ кг/кг.

Кількість випаруваної вологи, кг/с

$$W = G_1 - G_2 = 1,85 - 1,67 = 0,18,$$

$$G_1 = G_m(1 + w_1)/3600 = 6000(1 + 0,11)/3600 = 1,85,$$

$$G_2 = G_m(1 + w_2)/3600 = 6000(1 + 0,005)/3600 = 1,67.$$

Теоретична кількість повітря, необхідного для спалювання 1 кг палива, кг/кг

$$L_0 = [1,38 \cdot 0,0179 \text{CO} + 0,248 \text{H}_2 + \sum(m + n) C_m \text{H}_n / (12m + n)] = 1,38 \cdot 0,0179 \cdot 1,2 + 0,248 \cdot 4,2 + 92,2/8 + 2 + 6/4 \cdot 0,4/24 + 6 = 17,45.$$

Маса водяної пари і сухих газів, кг/кг

$$G_{\text{пр}} = \sum 0,09 \cdot n \cdot C_m \text{H}_n / (12m + n) \cdot 10^{-2} = 0,09 \cdot [4/16 \cdot 92,2 + 6/30 \cdot 0,4 \cdot 10^{-2}] = 0,0208,$$

$$G_{\text{ср}} = 1 - G_{\text{пр}} = 1 - 0,0208 = 0,9792.$$

Коефіцієнт надлишку повітря, необхідний для отримання суміші з температурою $t_1=900^\circ\text{C}$ за (8.5)

$$\alpha = (53 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 + 120 - 0,9792 \cdot 1900 - 0,0208 \cdot 4183) \cdot (17,45 \cdot 1309^{-1}) = 2,3,$$

де $h_n = 2500 + 1,97 \cdot 900 = 4183$; $h_{nb} = 1900 + 4183 \cdot 0,11 - 45 = 1309$.

Маса сухих газів і водяної пари у суміші, кг/кг

$$G_n = G_{nr} + \alpha L_0 \cdot d_0 = 0,0208 + 2,3 \cdot 17,45 \cdot 0,011 = 0,432,$$

$$G_r = 1 + \alpha L_0 - G_n = 1 + 2,3 \cdot 17,45 - 0,432 = 44,2.$$

Вологовміст суміші на вході в сушарку, кг/кг

$$d_1 = G_n / G_r = 0,432 / 44,2 = 0,00977.$$

Ентальпія суміші на вході в сушарку, кДж/кг

$$h_1 = (Q_b^p \cdot \eta_r + C_n \cdot t_n + \alpha L_0 C_{nb} t_{nb}) / G_r =$$
$$= (53 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 + 1 \cdot 20 + 2,3 \cdot 17,45 \cdot 1 \cdot 20) / 44,2 = 1020.$$

Фізичні властивості суміші при середній температурі в сушарці

$$t_{cp} = 0,5(t_1 + t_2) = 0,5(900 + 120) = 510^\circ\text{C},$$

$$\rho_{cm} = 0,51 \text{ кг/м}^3; \lambda_{cm} = 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \nu_{cm} = 81 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$C_{cm} = 0,85 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Теплова потужність, що витрачається на випаровування вологи і нагрівання матеріалу, кВт

$$Q_w = W(2500 + 1,97t_2 - 4,19t_{m1}) = 0,18(2500 + 1,97 \cdot 120 - 4,19 \cdot 20) = 477,$$

$$Q_m = G_m \cdot C_m(t_{m2} - t_{m1}) / 3600 = 6000 \cdot 0,85 \cdot 80 - 20 / 3600 = 85.$$

Теплові втрати в навколишнє середовище приймаємо: $Q_6 = 10$ кВт з наступним уточненням.

Необхідна витрата сушильного агента, кг/с

$$G_{cm} = (Q_w + Q_m + Q_6) [C_{cm}(t_1 - t_2)]^{-1} =$$
$$= (477 + 85 + 10) [0,85(900 - 120)]^{-1} = 0,86.$$

Питома витрата сушильного агента кг/кг

$$l = G_{cm} / W = 0,86 / 0,18 = 4,77.$$

Кінцевий вологовміст суміші, кг/кг

$$d_2 = (1 - \epsilon d_1) \cdot \epsilon = (1 - 4,77)0,00977/4,77 = 0,2.$$

Питомі теплові витрати, кДж/кг

$$\Delta = C_v \cdot t_{m1} - (q_m + q_{zv} + q_{\delta}) = C_v \cdot t_{m1} - [Q_m/W + 4187 \cdot 0,5(\omega_1 - \omega_2) + Q_{\delta}/W] = \\ = 4,19 \cdot 20 - [85/0,18 + 4187 \cdot 0,5(0,11 - 0,005) + 10/0,18] = -662,5.$$

Ентальпія газів на виході з сушарки, кДж/кг

$$h_2 = h_1(d_2 - d_1) \cdot \Delta = 1020 + (0,2 - 0,0097) \cdot (-662,5) = 893,9.$$

Уявна густина матеріалу в барабані, кг/м³

$$\rho_y = (G_{cm} \rho_{cm} + G_m \rho_m) / (G_{cm} + G_m) = \\ = (0,86 \cdot 0,51 + 6000 \cdot 1640/3600) / (0,86 + 1,666) = 1118.$$

Припустимо швидкість газу на виході з сушарки, визначаємо з додатка Ж

$$W_2 = 1,25 \text{ м/с.}$$

Приймаємо барабан діаметром 1 м з коефіцієнтом заповнення $\phi = 0,15$, кількістю лопаток насадки $z = 6$, частотою обертання $n = 8,12$ об/хв. (додаток И).

Перевіряємо внутрішній діаметр барабана за (8.71), м

$$D_{\text{вн}} = \{4,086[3,14(1 - 0,15)1,25]^{-1}\}^{0,5} \times \\ \times \{[8314 \cdot 393(0,973 + 0,2)30/18]/30 \cdot 10^5\}^{0,5} = 1,21,$$

де $A = 0,973$ з табл.8.1; $M_{cm} \approx 30$ кг/кмоль – молярна маса суміші.

Отже, остаточно приймаємо $D_{\text{вн}} = 1,2$ м, а з додатка К визначаємо технічні характеристики сушарки:

$$z = 8; \phi = 0,18; \beta = 140^\circ; F_m = 0,045; h_{cp} = 1,08; S_m = 3,1; S_{or} = 6,7.$$

Середня швидкість руху сушильного агента відносно падаючих частинок, м/с

$$W_{cp} = (W_2^2 + 2,21h_{cp})^{0,5} = (1,25^2 + 2,21 \cdot 1,08)^{0,5} = 1,89.$$

Коефіцієнт тепловіддачі α_v' за (8.72), Вт/(м²·К)

$$\alpha_v' = 0,78(0,0458)^{0,2} \cdot 140^{0,8} \cdot 1,08^{1,1} \cdot 0,036 \cdot (1118/1640)^2 (1,89/81 \cdot 10^{-6})^{0,5} / \\ / (1,2^{0,7} \cdot 1,2^2) \cdot \{0,045 \cdot 8/140 [9,81 \cdot 3,1 \cdot \sin(4) \cdot 0,75]^{-0,5} + \\ + 1,08 \cdot \text{tg}3,75 + 0,316 \cdot (0,51 \cdot 1,89)^2\}^{0,8} = 398.$$

Коефіцієнт тепловіддачі α_v'' за (8.73), Вт/(м²·К)

$$\alpha_v'' = 0,343 \cdot 0,036 \cdot 8^{0,33} (1,89 \cdot 3,1/81 \cdot 10^{-6})^{0,66} / 1,2^2 = 26,7.$$

Коефіцієнт тепловіддачі α_v''' за (8.74), Вт/(м²·К)

$$\alpha_v''' = [6,5(4,46 \cdot 0,51)1,89]6,7/1,2^2 \approx 50.$$

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К)

$$\alpha_v = \alpha_v' + \alpha_v'' + \alpha_v''' = 398 + 26,7 + 50 = 474,7.$$

Середній температурний напір за (8.76), °С

$$\Delta t_{cp} = (900 - 20) - (120 - 80) / \ln(880/40) = 271.$$

Необхідний об'єм барабана за (8.77), м³

$$V_6 = 1,2 \cdot 477 + 85 \cdot 10^3 / 474,7 \cdot 271 = 5,24.$$

Необхідна довжина барабана, м

$$L_6 = V_6 / (0,785 D_{вн}^2) = 5,24 / (0,785 \cdot 1,2^2) = 4,63.$$

Таким чином приймаємо стандартну довжину барабана $L_6 = 6$ м (див. додаток II). Тоді дійсний об'єм барабана, м³

$$V_6 = 0,785 D_{вн}^2 L_6 = 0,785 \cdot 1,2^2 \cdot 6 = 6,78.$$

Тривалість перебування частинок матеріалу в барабані за (8.79), хв.

$$\tau = 6 [1,2 \cdot 8^{0,7} (0,43 \operatorname{tg}(4) + 0,011 \cdot 1,25^{1,3}) / (0,51 \cdot 1,2)]^{-1} = 21,8.$$

Розрахунковий коефіцієнт заповнення барабана за (8.80)

$$\varphi^p = 0,5(1,85 + 1,67)21,8 / (60 \cdot 6,78 \cdot 0,51) = 0,1849.$$

Оскільки $0,84 < \varphi^p / \varphi < 1,16$, то розрахунок можна не уточнювати. Потужність привода барабана за (8.71), кВт

$$N_6 = 0,013 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 6,78 \cdot 1118 \cdot 8 / (0,95 \cdot 0,98) = 5.$$

Далі визначають потужність вентилятора для нагнітання повітря в топку, витрату палива, потужність димососа для нагнітання топкових газів в барабан сушарки і техніко-економічні показники сушильної установки (див. прикл. 8.2).

Література

1. Ткаченко С. Й. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник / С. Й.Ткаченко, О. Ю. Співак. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 76 с
2. Чернобыльский И. И. Сушильные установки химической промышленности / И. И.Чернобыльский, Ю. М. Танайко. – К. : Техника, 1969. – 279 с.
3. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / Гинзбург А. С. – М. : Пищевая промышленность, 1973. – 527 с.
4. Лыков А. В. Теория сушки / Лыков А. В. – М. : Энергия, 1969. – 314 с.
5. Зозулевич Б. В. Справочник мастера сушильного производства / Зозулевич Б. В., Кабанов Л. Н., Поповский П. Я. – М. : Агропромиздат, 1985. – 175с.
6. Кац З. А. Производство сушеных овощей, картофеля и плодов / Кац З. А. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 216с.
7. Исаченко В. П. Теплопередача / Исаченко В. П., Осипова В. М., Сукомел А. С. – М. : Энергия, 1975. – 470 с.
8. Лебедев П. Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / П. Д. Лебедев, А. А. Щукин. – М. : 1970. – 470 с.
9. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности / Лыков М. В. – М. : Химия, 1970. – 432 с.

Додатки

Додаток А
Діаграми вологого повітря

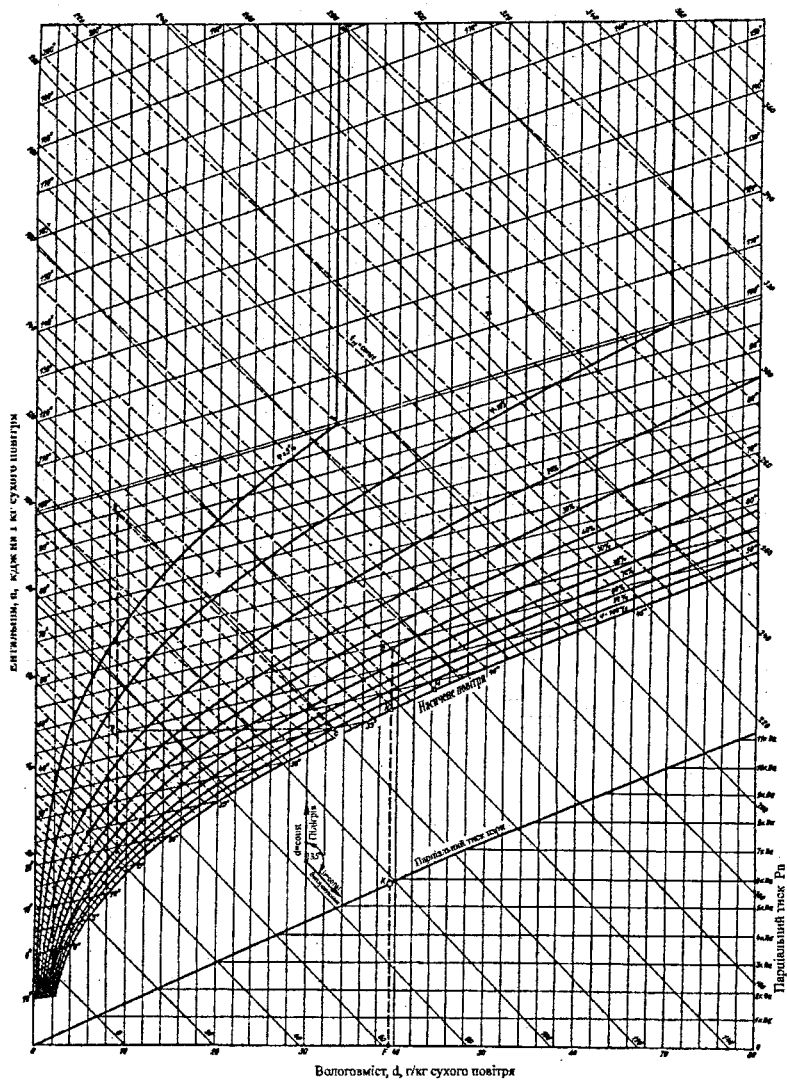


Рисунок А.1 – h-d діаграма вологого повітря для малих вологовмістів

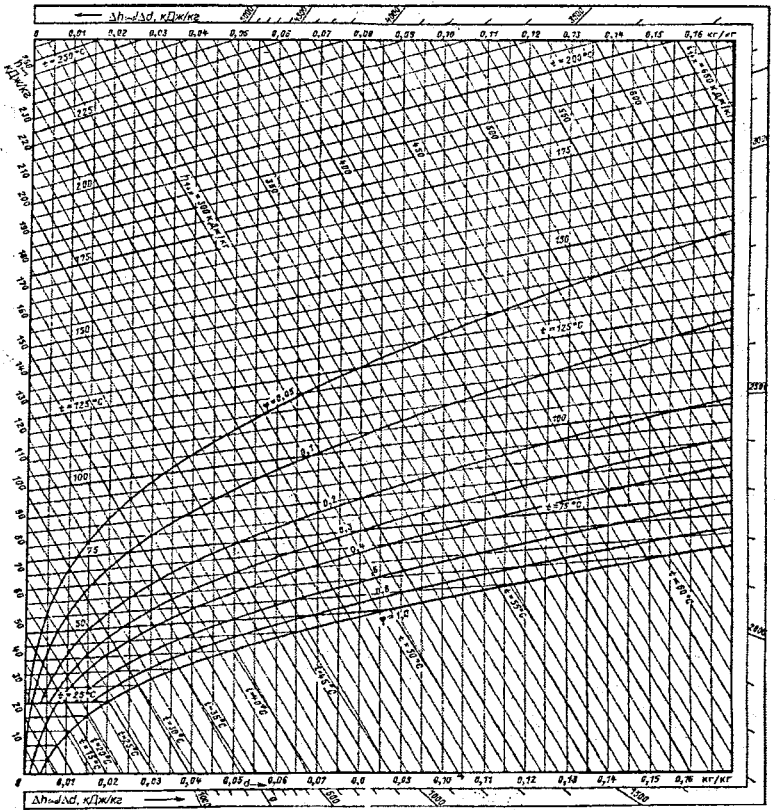


Рисунок А.2 – h-d діаграма волого повітря
ДЛЯ ВЕЛИКИХ ВОЛОГОВМІСТІВ

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Теплофізичні властивості води на лінії насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{бар}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	C_p кДж/(кг·град)	$\lambda,$ Вт/(м·град)	$\alpha, 10^7$ м ² /с	$\mu, 10^6$ Н·с/м ²	$\nu, 10^6$ м ² /с	$\beta, 10^4$ 1/град	$\sigma, 10^4$ кГ/м	Pr
0	1,01	999,9	4,212	0,551	1,31	1787,8	1,789	-0,63	77,1	13,67
10	1,01	999,7	4,191	0,574	1,37	1305,3	1,306	+0,7	75,6	9,52
20	1,01	998,2	4,183	0,599	1,43	1004,2	1,0006	1,82	74,1	7,02
40	1,01	992,2	4,174	0,634	1,53	653,2	0,659	3,87	71,0	4,31
60	1,01	983,2	4,178	0,659	1,60	468,8	0,478	5,11	67,5	2,98
80	1,01	971,8	4,195	0,674	1,66	355,0	0,365	6,32	63,8	2,21
100	1,01	958,4	4,220	0,683	1,69	383,4	0,295	7,52	60,0	1,75
120	1,99	943,1	4,25	0,686	1,71	237,3	0,252	8,64	55,9	1,47
140	3,62	926,1	4,287	0,685	1,72	201,0	0,217	9,72	51,7	1,26
160	6,18	907,4	4,346	0,683	1,73	173,6	0,191	10,7	47,5	1,10
180	10,03	886,9	4,417	0,674	1,72	153,0	0,173	11,9	43,1	1,00
200	15,55	863,0	4,505	0,663	1,70	136,3	0,158	13,3	38,4	0,93
220	23,20	840,3	4,614	0,646	1,66	124,6	0,148	14,8	33,8	0,89
240	33,48	813,6	4,756	0,628	1,62	114,7	0,141	16,8	29,1	0,87
260	46,59	784,0	4,949	0,605	1,56	105,9	0,135	19,7	24,2	0,87
280	64,20	750,7	5,229	0,574	1,46	98,1	0,131	23,7	19,5	0,90
300	85,92	712,5	5,736	0,540	1,32	91,2	0,128	29,2	14,7	0,97
320	112,90	667,1	6,573	0,506	1,15	85,3	0,128	38,2	10,0	1,11
340	146,08	610,1	8,164	0,457	0,92	77,5	0,127	53,4	5,78	1,39
360	186,81	528,0	13,98	0,396	0,54	66,7	0,126	109,0	2,06	2,35
370	210,54	450,5	40,42	0,337	0,18	56,9	0,126	264,0	0,48	6,79

Додаток В

Таблиця В.1 – Теплофізичні властивості водяної пари на лінії насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$P, 10^5$ бар	$\rho'',$ кг/м ³	$\rho',$ кг/кг	$\Gamma,$ кДж/кг	$C_p,$ кДж/(кг·град)	$\lambda, 10^2$ Вт/(м·град)	$a, 10^6$ м ² /с	$\mu, 10^6$ Н·с/м ²	$\nu, 10^6$ м ² /с	Pr
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,7	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,4	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,394	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,291	0,658	17,76	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,512	0,544	18,25	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796,5	1661,4	4,468	4,803	0,453	18,84	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2789,8	1604,4	4,815	5,106	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2779,7	1542,9	5,234	5,489	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766,4	1478,3	5,694	5,827	0,261	20,60	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749,2	1404,3	6,280	6,268	0,216	21,29	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727,4	1325,2	7,118	6,838	0,176	21,97	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700,2	1238,1	8,206	7,513	0,141	22,86	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2665,9	1139,7	9,881	8,257	0,108	23,94	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,304	0,0811	25,21	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564,5	893,1	16,24	10,70	0,0580	26,58	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481,2	719,7	23,03	10,79	0,0386	29,14	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2330,9	438,4	56,52	17,10	0,0150	33,75	0,166	11,1

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмосферного тиску

t , °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/кг·К	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/м·К	$\alpha \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м ²	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
-50	1,548	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	212	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,803	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	44,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Додаток Д

Таблиця Д.1 – Термодинамічні властивості вологого повітря
($p = 100 \text{ кПа} = 750 \text{ мм рт. ст.}$)

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н}}, \text{Па}$	$d'', \text{г/кг}$	$c_{p, \text{e}} \text{ кДж/}^\circ\text{К} / (\text{кгК})$	$c_{p, \text{p}} \text{ кДж/}^\circ\text{К} / (\text{кгК})$	$i_0, \text{кДж/кг}$	$i''_{\text{н}}, \text{кДж/кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$\rho_0, \text{кг/м}^3$
-30	37,330	0,2323	1,006	1,0064	-30,18	0,5680	-29,61	1,434
-29	41,463	0,2580	1,006	1,0065	-29,17	0,6313	-28,54	1,428
-28	45,996	0,2862	1,006	1,0065	-28,17	0,7008	-27,47	1,422
-27	51,062	0,3178	1,006	1,0066	-27,16	0,7788	-26,38	1,416
-26	56,395	0,3510	1,006	1,0067	-26,16	0,8608	-25,30	1,411
-25	62,795	0,3908	1,006	1,0067	-25,15	0,9591	-24,19	1,405
-24	69,461	0,4324	1,006	1,0068	-24,14	1,062	-23,08	1,399
-23	76,794	0,4780	1,006	1,0069	-23,14	1,175	-21,96	1,394
-22	84,793	0,5279	1,006	1,0069	-22,13	1,298	-20,83	1,388
-21	93,459	0,5818	1,006	1,0071	-21,13	1,432	-19,69	1,383
-20	102,925	0,6408	1,006	1,0072	-20,12	1,579	-18,54	1,377
-19	113,324	0,7057	1,006	1,0073	-19,11	1,740	-17,37	1,372
-18	124,656	0,7763	1,006	1,0075	-18,11	1,915	-16,19	1,366
-17	136,922	0,8528	1,006	1,0076	-17,10	2,106	-15,00	1,361
-16	150,387	0,9368	1,006	1,0078	-16,10	2,315	-13,78	1,356
-15	165,053	1,028	1,006	1,0079	-15,09	2,542	-12,55	1,351
-14	180,918	1,127	1,006	1,0081	-14,08	2,789	-11,30	1,345
-13	198,117	1,235	1,006	1,0083	-13,08	3,059	-10,02	1,340
-12	216,915	1,352	1,006	1,0085	-12,07	3,351	-8,72	1,335
-11	237,313	1,480	1,006	1,0088	-11,07	3,671	-7,40	1,330
-10	259,445	1,618	1,006	1,0090	-10,06	4,016	-6,04	1,325
-9	283,309	1,767	1,006	1,0093	-9,05	4,390	-4,66	1,320
-8	309,440	1,931	1,006	1,0096	-8,05	4,800	-3,25	1,315
-7	337,571	2,107	1,006	1,0099	-7,04	5,242	-1,80	1,310
-6	368,102	2,298	1,006	1,0103	-6,04	5,722	-0,31	1,305
-5	401,033	2,504	1,006	1,0107	-5,03	6,239	1,21	1,300
-4	436,763	2,729	1,006	1,0111	-4,02	6,805	2,78	1,295
-3	475,426	2,971	1,006	1,0116	-3,02	7,414	4,40	1,290
-2	517,156	3,233	1,006	1,0120	-2,01	8,074	6,06	1,286
-1	562,086	3,516	1,006	1,0126	-1,01	8,787	7,78	1,281
0	610,8	3,823	1,006	1,0131	0	9,561	9,56	1,276
1	656,6	4,111	1,006	1,0127	1,01	10,289	11,30	1,272
2	705,4	4,419	1,006	1,0143	2,01	11,068	13,08	1,267
3	757,5	4,748	1,006	1,0149	3,02	11,901	14,92	1,262
4	812,9	5,098	1,006	1,0155	4,02	12,788	16,81	1,258
5	871,8	5,470	1,006	1,0162	5,03	13,732	18,76	1,253
6	934,6	5,868	1,006	1,0170	6,04	14,742	20,78	1,249
7	1001,2	6,290	1,006	1,0178	7,04	15,814	22,86	1,244
8	1072,1	6,741	1,006	1,0186	8,05	16,960	25,01	1,240
9	1147,3	7,219	1,006	1,0195	9,05	18,176	27,23	1,236
10	1227,1	7,727	1,006	1,0205	10,06	19,470	29,53	1,231

Продовження таблиці Д.1

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{л}}, \text{Па}$	$d'', \text{г/кг}$	$c_{\text{п.с}}, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$c_{\text{п.}}, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$i_{\text{с}}, \text{кДж/кг}$	$i'_{\text{п.}}, \text{кДж/кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$\rho_{\text{с}}, \text{кг/м}^3$
11	1311,8	8,268	1,006	1,0215	11,07	20,848	31,93	1,227
12	1401,5	8,841	1,006	1,0225	12,07	22,310	34,38	1,223
13	1496,7	9,451	1,006	1,0237	13,08	23,867	36,95	1,218
14	1597,4	10,097	1,006	1,0249	14,08	25,517	39,60	1,214
15	1704,1	10,783	1,006	1,0268	15,09	27,271	42,36	1,210
16	1817,0	11,511	1,006	1,0275	16,10	29,133	45,23	1,206
17	1936,4	12,282	1,006	1,0290	17,10	31,108	48,21	1,201
18	2062,6	13,100	1,006	1,0305	18,11	33,204	51,31	1,197
19	2196,0	13,966	1,006	1,0322	19,11	35,425	54,54	1,193
20	2336,8	14,883	1,006	1,0339	20,12	37,779	57,90	1,189
21	2485,5	15,854	1,006	1,0357	21,13	40,273	61,40	1,185
22	2642,4	16,882	1,0061	1,0379	22,13	42,916	65,05	1,181
23	2807,9	17,970	1,0061	1,0398	23,14	45,716	68,86	1,177
24	2982,4	19,121	1,0061	1,0416	24,15	48,680	72,83	1,173
25	3166,3	20,338	1,0061	1,0435	25,15	51,816	76,97	1,169
26	3360,0	21,626	1,0061	1,0472	26,16	55,138	81,30	1,165
27	3563,9	22,987	1,0061	1,0491	27,16	58,651	85,82	1,161
28	3778,5	24,425	1,0061	1,0510	28,17	62,366	90,54	1,158
29	4004,3	25,946	1,0062	1,0548	29,18	66,298	95,48	1,154
30	4241,7	27,552	1,0062	1,0586	30,19	70,453	100,64	1,150
31	4491,3	29,250	1,0062	1,0604	31,19	74,850	106,04	1,146
32	4753,6	31,043	1,0062	1,0642	32,20	79,496	111,69	1,142
33	5029,0	32,937	1,0063	1,0680	33,21	84,408	117,61	1,139
34	5318,2	34,927	1,0063	1,0718	34,21	89,599	123,81	1,135
35	5621,7	37,050	1,0063	1,0755	35,22	95,087	130,31	1,131
36	5940,1	39,281	1,0063	1,0792	36,23	100,886	137,11	1,128
37	6274,0	41,637	1,0064	1,0849	37,24	107,015	144,25	1,124
38	6624,0	44,124	1,0064	1,0883	38,24	113,49	151,73	1,120
39	6990,7	46,750	1,0064	1,0937	39,25	120,33	159,58	1,117

Додаток Е

Таблиця Е.1 – Теплофізичні властивості димових газів

($V = 760$ мм рт. ст. $\approx 0,01 \cdot 10^5$ Па; $\bar{p}(\text{CO}_2) = 0,13$; $\bar{p}(\text{H}_2\text{O}) = 0,11$; $\bar{p}(\text{N}_2) = 0,76$)

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	λ , 10 ² Вт/(м·К)	α , 10 ⁶ м ² /с	μ , 10 ⁶ Па·с	ν , 10 ⁶ м ² /с	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,310	1,290	10,0	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Додаток Ж

Таблиця Ж.1 – Максимальна припустима швидкість газу на виході з сушарки

Уявна густина матеріалу, кг/ м ³	Швидкість газу м/с при еквівалентному діаметрі частинок, мм		
	0,3	0,3...2	2
600	0,5	0,5–0,75	1–2
1500	1,75	1,75–3,5	3–5
2000	3	3–7,5	8
2500	4	4–10	10
2500	5	5–12	13

Додаток И

Таблиця И.1 – Технічна характеристика барабанних сушарок (ГОСТ 27134-87)

Габарити барабана		Частота обертів n , об/хв	Кількість лопаток насадки z	Кут повороту барабана β , °	Коефіцієнт заповнення φ	Середня висота падіння h_{cp} , м	Площа перерізу матеріалу F_m , м	Сумарна довжина відрізків у поперечному перерізі барабана		Довжина основної та секторної лопаток						
діаметр $D_{вн}$, м	довжина L_0 , м							S_m , м	$S_{ог}$, м	ℓ_1 , м	ℓ_{2m} , м					
1,0	4	4,06	6	140	0,15	0,62	0,035	1,20	4,16	2,3	0,8					
1,0	6					0,74	0,050	1,43	5,00	3,5						
1,2	6				0,18	1,08	0,045	3,10	6,70	3,5	4,7	0,9				
1,2	8		1,24										0,060	3,43	8,30	4,7
1,2	10		1,34										0,070	3,70	9,10	5,9
1,6	8	3,2	12	120	0,22	1,54	0,074	3,90	11,0	4,7	1,1					
1,6	10					1,59	0,068	4,48	12,6	5,9						
1,6	12					1,61	0,062	4,62	14,1	7,0						
2,0	8		14		14	0,25	0,16	0,053	2,70	7,90	4,7	1,2				
2,0	10						0,20	0,045	3,30	9,50	5,0					
2,0	12						0,24	0,034	4,30	12,7	7,0					
2,2	10		16		16	0,25	0,34	0,044	4,90	15,4	5,9	-				
2,2	12						0,40	0,040	6,05	17,4	7,0					
2,2	14						0,45	0,050	6,86	19,8	8,2					
2,2	16	0,61		0,050			6,86	19,8	9,3							

Українсько-англійський словник найбільш вживаних термінів

ентальпія	– enthalpy
вологоміст	– moisture content
сухий	– dry
повітря	– air
відносна	– relative
вологість	– humidity
парціальний	– partial
тиск	– pressure
водяна	– water
пара	– vapor
стан повітря	– air condition
ізотерма	– isotherm
точка роси	– dew point
насичений	– saturated
конденсація	– condensation
крива	– curve
густина	– density
плівка	– pellicle, film
психрометр	– hygrometer
парціальний тиск пари	– partial pressure of vapor
теоретична сушарка	– theoretical dryer
дійсна сушарка	– valid dryer
витрата	– expense
сушіння	– drying
агрегатний стан	– aggregate state
контактний масообмін	– contact mass-transfer
фазове перетворення	– phase transformation
кондукція	– conduction
конвекція	– convection
радіація	– radiation
механічне обезводнення	– mechanical dehydration
інтенсивність сушіння	– intensity of drying
рушійна сила переносу	– motive force of transfer
криві сушіння	– curves dryings
адіабатне випаровування	– adiabatic evaporation
перша критична точка	– first critical point
усадка	– squeezing
терморадіаційне сушіння	– thermoradiatic drying
потенціалопровідність	– conductivity of potential
сорбція	– sorption
десорбція	– desorption

Навчальне видання

Співак Олександр Юрійович

СУШИЛЬНІ ПРОЦЕСИ ТА УСТАНОВКИ ПРИКЛАДИ ТА ЗАДАЧІ

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено О. Співаком

Підписано до друку 05.12.2014 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 7,7.
Наклад 75 пр. Зам. № 2014-019.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р