С. Й. Ткаченко, О. Ю. Співак

Сушильні процеси та установки

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. Й. Ткаченко, О. Ю. Співак

СУШИЛЬНІ ПРОЦЕСИ ТА УСТАНОВКИ

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів напряму підготовки 0905 – “Енергетика”. Протокол № 8 від 24 січня 2008 р.

Вінниця ВНТУ 2008

УДК 621.181.7
Т 44

Рецензенти :

В. С. Фокін, доктор технічних наук, професор НТУ «ХПІ»
А .Ф. Пономарчук, доктор технічних наук, професор ВНТУ
М. М. Чепурний, кандидат технічних наук, професор ВНТУ

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Ткаченко С. Й., Співак О. Ю.

Т44 **Сушильні процеси та установки**. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2007. - 76 с.

В посібнику розглянуто аналітичні та графічні методи розрахунків процесу сушіння для різних схем руху теплоносія та основи проектування сушарок різних конструкцій. Викладені особливості компонування та розрахунки окремих елементів сушильних установок. Наведені приклади графічних розрахунків процесу сушіння та всі необхідні довідкові матеріали для теплових розрахунків сушарок. Посібник розроблений у відповідності з програмою дисципліни „Сушильні процеси та установки”.

УДК 621.181.7

© С. Й. Ткаченко, О. Ю. Співак, 2008

З М І С Т

ВСТУП 5
1 СУШІННЯ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ОЗНАЧЕННЯ 6
1.1 Принципи обезводнення ……...6
1.2 Класифікація методів теплового сушіння 8
2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ СУШІННЯ..... 12
2.1 Крива процесу сушіння 12
2.2 Криві швидкості сушіння..... 15
2.3 Температурні криві сушіння..... 21
2.4 Ізотерми сорбції і десорбції 22
2.5 Властивості води..... 22
3 ВОЛОГИЙ МАТЕРІАЛ..... 24
3.1 Основні поняття і означення 24
3.2 Класифікація форм зв'язку вологи в колоїдних капілярно–пористих матеріалах..... 26
3.2.1 Хімічний зв'язок.....26
3.2.2 Фізико–хімічний зв'язок.....26
3.2.3 Фізико–механічний зв'язок 27
3.3 Класифікація твердих вологих матеріалів 27
3.4 Потенціал масопереносу, масоємність 28
3.5 Теплоємність вологого матеріалу 28
3.6 Теплопровідність вологих матеріалів..... 29
3.7 Температуропровідність вологих матеріалів..... 30
4 РОЗРАХУНОК КОНВЕКТИВНИХ СУШАРОК З ОДНОКРАТНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ГАРЯЧОГО ПОВІТРЯ 31
4.1 Матеріальний баланс процесу сушіння..... 31
4.2 Витрата повітря і теплоти для випаровування 1 кг вологи 32
4.3 Розрахунок теоретичної сушарки за допомогою h–d діаграми..... 33
4.4 Розрахунок дійсної сушарки..... 34
4.4.1 Рівняння теплового балансу дійсної сушарки.....35
4.4.2 Побудова процесу для дійсної сушарки на h–d–діаграмі 37
5 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ СХЕМ КОНВЕКТИВНИХ СУШАРОК 38
5.1 Сушарка з додатковим підігрівом повітря в сушильній камері..... 38
5.2 Сушарка з проміжним підігрівом повітря..... 39
5.3 Сушарка з частковою рециркуляцією..... 40
5.4 Сушарка із замкненою циркуляцією 42
6 ОСНОВНІ ТИПИ І КОНСТРУКЦІЇ СУШАРОК..... 43
6.1 Основні принципи конструювання та експлуатації сушильної техніки.. 43
6.2 Способи класифікації сушильної техніки 43
6.3 Конвективні атмосферні сушарки..... 43
6.4 Вплив умов та параметрів на процес конвективного сушіння 45
7 ПРИСТРОЇ ДЛЯ СУШІННЯ КУСКОВИХ МАТЕРІАЛІВ..... 47
7.1 Камерні сушарки..... 47

7.2 Тунельні (коридорні) вагонеткові сушарки 47
7.3 Стрічкові сушарки 50
7.4 Конвеєрні сушарки 51
8 СУШІННЯ СИПУЧИХ, ПОДРІБНЕНИХ АБО ДИСПЕРГОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ…….52
8.1 Шахтні сушарки 52
8.2 Барабанні сушарки 52
8.3 Пневматичні сушарки 54
8.4 Сушарки з киплячим шаром 57
8.5 Сушарки з віброкиплячим шаром 60
8.6 Сушарки, що працюють за принципом розпилювання 60
8.7 Терморадіаційні сушарки 62
9 КОНТАКТНІ АТМОСФЕРНІ І ВАКУУМНІ СУШАРКИ 65
9.1 Вальцеві сушарки 65
9.2 Циліндричні сушарки 65
9.3 Трубчасті сушарки 65
9.4 Вакуумні контактні сушарки 67
10 ПРОГРЕСИВНІ СПОСОБИ СУШІННЯ 68
10.1 Сублімаційні сушарки 68
10.2 Сушіння матеріалів в полі струмів високої частоти і комбіновані способи сушіння матеріалів 69
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ 71
ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ СУШАРКИ…….73
ЛІТЕРАТУРА 77
Додаток А – h-d діаграма вологого повітря……..……..81
Додаток Б – Теплофізичні властивості води на лінії насичення 79
Додаток В – Теплофізичні властивості водяної пари на лінії насичення 81
Додаток Г – Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмосферного тиску 82
Додаток Д – Термодинамічні властивості вологого повітря 83
Додаток Е – Теплофізичні властивості димових газів 85

ВСТУП

Процес сушіння (drying) використовується в багатьох технологічних процесах промисловості. Об′єктами сушіння можуть бути різноманітні матеріали на різних стадіях їх переробки (сировина, напівфабрикати, готові вироби). Метою сушіння є покращення фізико-механічних властивостей матеріалу або надання нових, зниження його ваги, покращення транспортабельності матеріалу тощо.

Однією із глобальних світових проблем сьогодення є економія енергоресурсів, залучення в сферу їх виробництва нетрадиційних джерел, впровадження енергозбережних технологій. Важливою стадією багатьох технологічних процесів, які застосовують у хімічній, фармацевтичній, деревообробній та інших галузях промисловості України є сушіння, на яке витрачається значна кількість енергетичних ресурсів. Тільки у хімічній промисловості необхідно сушити близько 200 тис. різноманітних продуктів (з них понад 80% становлять дисперсні матеріали), на які витрачається приблизно 15% видобутого палива та електроенергії. Як свідчить статистика, енергоємність технологічних процесів в Україні є у 3-5 разів вищою, ніж у розвинених країнах. В більшості випадків на процеси сушіння використовується у 2,5-3 рази більше енергії від необхідної для перетворення вологи у пару, що свідчить про недосконалість технології сушіння. В багатьох випадках технологічні режими процесу сушіння та обладнання розраховують на основі емпіричних залежностей, що призводить до значних розбіжностей між прогнозованими параметрами процесу і реальними.

Спеціаліст-теплоенергетик в залежності від профілю його практичної роботи повинен мати досить глибокі знання в області теорії, практики та технології сушіння та вміти їх використовувати в своїй професійній діяльності.

Відсутність відповідної спеціальної літератури українською мовою утруднює вивчення студентами теорії сушильних процесів та масообміну в процесі сушіння. Сушіння є типовим необоротним процесом, для аналізу якого доцільно використати основні принципи термодинаміки необоротних процесів. У відповідності з принципом лінійності інтенсифікації процесу сушіння можна досягти як за рахунок збільшення кінетичних коефіцієнтів, котрі характеризують релаксаційні властивості сировини (коефіцієнти дифузійного та молярного переносу вологи), так і підвищенням рушійних сил процесу (градієнтів вологовмісту, температури, тиску). Вміння правильно вибирати технологічні режими сушіння із мінімізацією енерговитрат, знання основних принципів побудови та експлуатації сушильної техніки зараз є невід′ємною частиною підготовки спеціаліста-теплоенергетика.

Автори щиро вдячні рецензентам за корисні зауваження та побажання і висловлюють подяку колективу кафедри теплоенергетики ВНТУ за допомогу в процесі підготовки рукопису до друку.

1 СУШІННЯ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ОЗНАЧЕННЯ

Сушінням називають процес видалення з матеріалу рідини, в результаті чого в ньому збільшується відносний вміст сухих речовин.

Матеріали сушаться з різною метою: для зменшення маси (це здешевлює транспортування), збільшення міцності (кераміка, деревина), підвищення теплоти згорання (паливо), підвищення стійкості при зберіганні і консервуванні (продукти, зерно, хліб тощо).

Сушіння є складним технологічним процесом, який часто буває основним етапом виробництва.

1.1 Принципи обезводнення

За енергетичними ознаками можна виділити два основних принципи обезводнення:

а) видалення води з матеріалів без зміни її агрегатного стану (aggregate state) – у вигляді рідини.

б) видалення води із зміною її агрегатного стану (лід, пара).

Перший принцип реалізується механічним способом (пресуванння, центрифугування, фільтрування) або при безпосередньому контакті вологого матеріалу з речовинами, що мають більш низький потенціал переносу (контактний масообмін) (contact mass-transfer).

Другий принцип сушіння пов’язаний з витратою теплоти на фазове перетворення (phase transformation) вологи. В більшості випадків теплота надходить до матеріалу зовні відомими способами: кондукцією (conduction), конвекцією (convection), радіацією (radiation), для прогріву матеріалу від поверхні до середини, або за допомогою СВЧ з прогрівом матеріалу в масі. Таке сушіння називають тепловим.

Теплове сушіння твердих матеріалів реалізується з випаровуванням вологи на зовнішній (геометричній) поверхні тіла. При сушінні за допомогою СВЧ відбувається випаровування вологи (води) в масі матеріалу. Осушення вологого сушильного агента може відбуватися шляхом його охолодження до температури нижче температури точки роси, при якій водяна пара починає конденсуватися. Найчастіше, як при конвективному сушінні, відпрацьоване вологе повітря викидають в атмосферу, забираючи замість нього свіже, з меншим вологовмістом.

Якщо процес сушіння проходить під вакуумом без підведення теплоти зовні, то теплота, необхідна для випаровування вологи, відбирається від матеріалу, який висушується. Температура матеріалу стає нижчою від потрійної точки і волога, яка ще не випарувалась, самозамерзає. Подальше підведення теплоти зовні призводить до сублімації льоду.

Використання певних принципів обезводнення і методів сушіння зумовлено видом енергії зв’язку з матеріалом. Якщо агрегатний стан вологи не змінюється, то можна видалити лише вологу, яка найменш міцно зв’язана з ма-

теріалом. Якщо змінюється агрегатний стан вологи, то енергія витрачається як на розрив зв'язків вологи з матеріалом, так і на теплоту пароутворення.

Механічне обезводнення (mechanical dehydration) (пресування, центрифугування) є більш дешевим методом, ніж теплове сушіння, тому при значній вологості доцільним є використання саме цього методу. Підвищення концентрації розчину шляхом випаровування з багаторазовим використанням теплоти в багатокорпусних випарних апаратах є також більш економічним ніж процес сушіння випаровуванням. Тому сушіння випаровуванням, як правило, використовується на кінцевому етапі технологічного процесу сушіння, коли необхідно видалити як вільну, так і більш міцно зв'язану вологу.

Сушіння є типовим нестаціонарним необоротним (irreversible transient) процесом, в якому вологовміст матеріалу змінюється як за об'ємом, так і з часом, а сам процес прямує до рівноваги. Інтенсивність сушіння (intensity of drying) залежить від фізико–хімічних властивостей матеріалів і рушійної сили процесу *X*. Таку залежність можна описати лінійним рівнянням, що відповідає першому принципу термодинаміки необоротних процесів:

$$j = L \cdot X, \tag{1.1}$$

де j – густина потоку;
L – кінетичний коефіцієнт, що залежить від фізико–хімічних властивостей матеріалу;
X – рушійна сила процесу.

Рушійна сила переносу (motive force of transfer) вологи має вигляд:

$$X_m = -\nabla \frac{\mu}{T}, \tag{1.2}$$

де *?* – хімічний потенціал речовини;
T – температура.

В окремих випадках рушійною силою переносу можуть бути градієнти концентрації вологи (вологовмісту), температури, осмотичного тиску (osmolality pressure), загального тиску всередині тіла тощо [1]. Процес сушіння можна інтенсифікувати за рахунок збільшення кінетичних коефіцієнтів L і рушійних сил *X*. Однак слід врахувати, що ці фактори залежать від температури і вологості тіла, тобто змінюються в процесі сушіння.

Збільшення рушійних сил сушіння обмежується властивостями самих матеріалів: термостійкістю і вологостійкістю, а от кінетичні коефіцієнти (наприклад коефіцієнт дифузії вологи всередині матеріалу) можна за певних умов значно підвищити. Важливе значення тут мають нові методи енергопідведення і знаходження додаткових рушійних сил, наприклад, при накладанні додаткового акустичного, електричного і магнітного полів.

Велику перспективу мають імпульсні методи обробки матеріалів в процесах сушіння: осцилюючі режими (нагрів–охолодження), вібросушіння, сушіння в акустичному полі, обробка СВЧ, інфрачервоним промінням тощо.

Такі методи, різноманітні за фізичною природою, діють на структуру матеріалу і на зв'язок вологи з сухим скелетом, часто допомагають прискоренню процесу сушіння.

1.2 Класифікація методів теплового сушіння

Найменування методу сушіння	Спосіб підведення теплоти до матеріалу	Джерело енергії	Механізм видалення вологи	Характеристика вологих матеріалів	Область використання
Конвективне сушіння	Конвекція – перенос теплоти в середовищі з неоднорідним розподілом температури, який реалізується за допомогою макроскопічних елементів середовища при їх переміщенні	Нагрітий газ (повітря, продукти згорання палива) парогазові суміші, які омивають вологий матеріал в різноманітних умовах	Перенос вологи всередині матеріалу за рахунок неізотермічної масопровідності як у вигляді рідини так і у вигляді пари. Випаровування проходить спочатку на відкритій поверхні матеріалу а потім зона випаровування заглиблюється всередину матеріалу	Твердий матеріал різноманітної форми, структури і різних розмірів, різні пасти і рідини (розчини)	Сушіння різноманітних матеріалів для найбільш простого конструктивного оформлення сушильних камер, сушильний агент одночасно є теплопередавачем і вологопоглиначем
Кондуктивне сушіння	Кондукція – молекулярний перенос теплоти за допомогою теплового руху мікрочасточок в суцільному середовищі, зумовлений градієнтом температури	Нагріті поверхні (плити, вальці, циліндри тощо) до яких притискається вологий матеріал	а) при низьких температурах грієючих поверхонь випаровування проходить на відкритій поверхні матеріалу. б) при високих температурах t>85–110°С інтенсивне пароутворення всередині матеріалу (в контактному шарі) і молярний перенос пари до відкритої поверхні за рахунок градієнта загального тиску ∇p. Виникнення ∇p зумовлене тим, що швидкість утворення пари в контактному шарі більша ніж швидкість переносу пари	Тонкі листові, волокнисті матеріали (папір, тканини, шпон, пюре, пасти, рідини (молоко, дріжджі, фармацевтичні препарати тощо)	Сушіння тонких матеріалів з високою інтенсивністю – на 1–2 порядки вище ніж при конвективному сушінні

Найменування методу сушіння	Спосіб підведення теплоти до матеріалу	Джерело енергії	Механізм видалення вологи	Характеристика вологих матеріалів	Область використання
Сушіння під дією енергетичних полів **а) електромагнітне поле** **1. Терморадіаційне сушіння інфрачервоним випромінюванням**	Терморадіація – перенос енергії від генератора випромінюваннядо об'єкта шляхом електромагнітних коливань через середовище проникне для теплового випромінювання	Випромінювачі нагріті до високої температури а) темні $T_{випр} \approx 1000 \div 1200$К б) світлі $T_{випр} \approx 2200 \div 2500$К	В зв'язку з проникненням короткохвильового інфрачервоного випромінювання в товщину матеріалу і віддачею теплоти з поверхні матеріалу в навколишнє середовище утворюється аномальний розподіл температури: на деякій глибині вона вища ніж на поверхні і значно вища ніж всередині матеріалу. Внаслідок цього виникає градієнт концентрації вологи	а) Тонкі матеріали: покрашені поверхні, папір, бісквіти тощо б) товсті матеріали (тісто, хліб)	Теплові напруги поверхні матеріалу перевищують напруги при конвективному сушінні в 30–70 раз, що значно інтенсифікує сушіння тонких матеріалів і прискорює сушіння товстих. В останній час рекомендується для сушіння продуктів харчування
2. Сушіння в електричному полі СВЧ і СЗВЧ	Перетворення енергії електричного поля високої частоти в теплоту в масі вологого матеріалу, який прогрівається у всьому об'ємі	Генератори ВЧ і ЗВЧ	Пароутворення проходить в масі матеріалу, інтенсивність його залежить від кількості виділеної теплоти	Різні діелектрики і напівпровідники, вологі матеріали – цукор рафінад, боби какао, зерно, тісто, хліб	Використовується для видалення вологи з матеріалів, які важко сохнуть (великих керамічних виробів), цукру, какао тощо. Для підвищення інтенсивності сушіння метод комбінують з конвективним

Найменування методу сушіння	Спосіб підведення теплоти до матеріалу	Джерело енергії	Механізм видалення вологи	Характеристика вологих матеріалів	Область використання
б) акустичне поле **Обезводження в акустичному полі ("холодне" і "тепле " акустичне сушіння)**	Дія на вологий матеріал акустичного поля, створеного генераторами ультразвуку. Коливання середовища як в приграничному шарі матеріалу, так і в капілярах. Деяке підвищення температури в матеріалі зумовлене переходом акустичної енергії в теплову	Генератори ультразвуку різних типів	Часткове видалення вологи в вигляді рідини за рахунок виникнення градієнта загального тиску в матеріалі під дією проникних в нього акустичних хвиль і самовипаровування вологи. При додатковому підведенні енергії (конвекцією чи СВЧ) випаровування вологи, що вийшла на поверхню матеріалу під дією акустичних хвиль	Термолабільні капілярно-пористі матеріали	Використовують для сушіння різноманітної термолабільної сировини, в тому числі і харчової. Найбільший ефект досягається при використанні акустичної енергії в другий період сушіння
Комбіновані методи сушіння					
а) Комбіноване кондуктивно – конвективне циклічне сушіння	Кондукція – конвекція	Нагріті поверхні і повітря, яке є вологопоглиначем	Сушіння на нагрітій поверхні з переривчастим контактом і циркуляцією повітря між нагрітими поверхнями для видалення пари з контактного шару матеріалу	Тонкі листові матеріали	Сушіння паперу

Найменування методу сушіння	Спосіб підведення теплоти до матеріалу	Джерело енергії	Механізм видалення вологи	Характеристика вологих матеріалів	Область використання
б) комбіноване радіаційно – конвективне сушіння	Термовипромінювання – конвекція	Випромінювачі і повітря, яке є вологопоглиначем	Переривчасте випромінювання чергується з циркуляцією холодного повітря, що запобігає перегріву матеріалу	Тверді товсті і тонкі матеріали	Сушіння зерна, овочів, макаронних виробів тощо
в) комбіноване "діелектричне" і радіаційне сушіння	Діелектричний нагрів – термовипромінювання	Генератори ВЧ і випромінювачі	Суміщення прогріву в масі і випарювання вологи всередині матеріалу з інтенсивним випромінюванням на його поверхні	Діелектрики і напівпровідники	Сушіння і обжарювання бобів какао, використовується для випікання хліба

2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ СУШІННЯ

2.1 Крива процесу сушіння

Теорія сушіння створювалась на базі фундаментальних аналітичних і експериментальних досліджень. При сушінні видаляється волога, зв'язана з матеріалом фізико–механічними і фізико–хімічними зв'язками. В процесі сушіння волога переміщується з внутрішніх шарів матеріалу до його поверхні і з поверхні випаровується в навколишнє середовище.

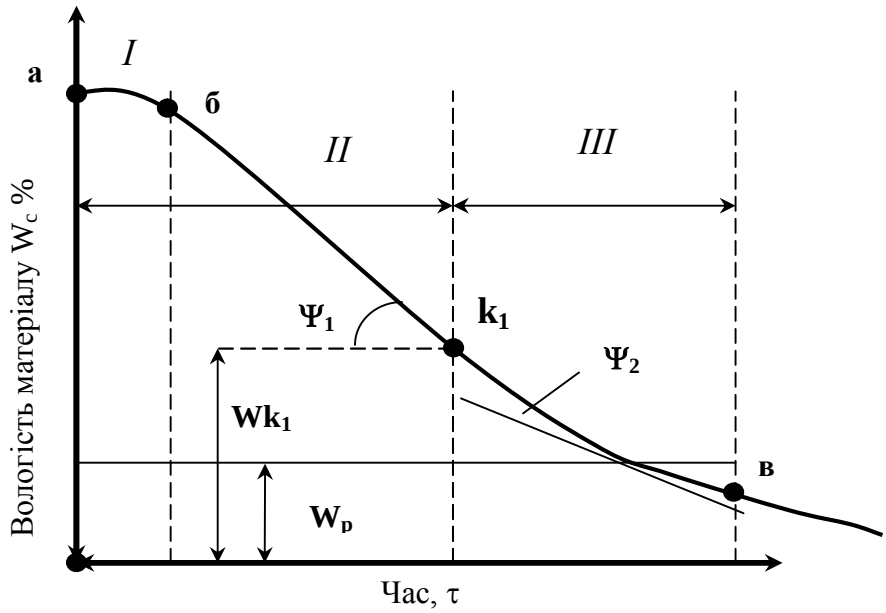


Рисунок 2.1 – Крива сушіння

Процес сушіння описується кривими сушіння (curves dryings), які характеризують зміну середньої (інтегральної) вологості матеріалу W^c під час сушіння τ. Аналіз таких кривих показує, що на початку процесу, коли вологість матеріалу зменшується по кривій *аб* має місце короткочасна стадія прогріву матеріалу (I). Тривалість цієї стадії залежить від товщини зразка.

Далі вологість (humidity) змінюється за лінійним законом: $\psi_1 = \frac{dW^c}{d\tau} = const.$ Цей період сушіння називають періодом постійної швидкості сушіння (II) лінія (б–k_1). В період II температура на поверхні матеріалу дорівнює температурі мокрого термометра (temperature of the wet thermometer), проходить адіабатне випаровування (adiabatic evaporation) вологи. Якщо є вільна волога, парціальний тиск водяної пари над матеріалом дорівнює тискові над чистою водою і не залежить ні від вологості матеріалу, ні від його характеру або виду.

Інтенсивність випаровування вологи з вільної поверхні при стаціонарному режимі (а режим II є стаціонарним) можна визначити за формулою Дальтона:

$$I = \frac{W}{F\tau} = \beta_p (P_П - P_C) \ , \ кг/(м^2 \cdot с), \qquad (2.1)$$

де W – кількість рідини, яка випарувалася, *кг*;
F – поверхня випаровування, $м^2$;
β_p – коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці парціальних тисків, $\frac{кг\ вологи}{м^2 \cdot с \cdot Па}$;
$P_П$, P_C – парціальний тиск водяної пари над поверхнею і в середовищі, *Па*,
τ – час, *с*.

Для наближених розрахунків можна користуватися формулою:

$$I = 5{,}7\ \omega^{0,8}\ (P_П - P_C), \ кг/(м^2 \cdot с), \qquad (2.2)$$

де ω – швидкість повітря, *м/с*.

Між кількістю рідини, що випарувалась, і витраченою теплотою є залежність:

$$q = I \cdot r = \alpha (t_I - t_N), \qquad Вт/м^2 \qquad (2.3)$$

де r – питома теплота випаровування, $\frac{Дж}{кг}$;
α – коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/(м^2 \cdot к)$;
t_c і t_n – температури навколишнього середовища і поверхні випаровування.

Оскільки для адіабатного випаровування температура навколишнього середовища дорівнює температурі сухого термометра, а температура поверхні – температурі мокрого, то:

$$I = \frac{W}{F\tau} = \frac{\alpha}{r}(t_c - t_i). \qquad (2.4)$$

Починаючи від точки k_1 (перша критична точка) (first critical point) швидкість випаровування знижується (III період сушіння). Точка k_1 відповідає початку випаровування з матеріалу зв'язаної (гігроскопічної вологи). Відповідна цій точці вологість називається *критичною вологістю матеріалу*. Вона більша гігроскопічної, бо при сушінні вологість внутрішніх шарів матеріалу більша, ніж на поверхні і залежить від товщини матеріалу і режиму сушіння (швидкості і параметрів сушильного агента). Зниження коефіцієнта α в III періоді сушіння враховують через відповідну зміну вологовмісту:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \left(\frac{W_г}{W_{кр}} \right)^n, \qquad (2.5)$$

де α_0 – коефіцієнт тепловіддачі в періоді постійної швидкості сушіння;
$W_г$, $W_{кр}$ – кінцева і критична вологість матеріалу відповідно;
n – показник степеня, що залежить від властивостей матеріалу і визначається експериментально.

В кінці сушіння крива сушіння асимптотично наближається до лінії рівноважної вологості, причому W_p (рівноважна вологість) відповідає вибраному режиму сушіння. При рівноважній вологості сушіння закінчується, його швидкість рівна нулю. Для тонких матеріалів період I настільки короткочасний, що на кривій сушіння його не видно. Для товстих матеріалів,

особливо тих, що характеризуються малою вологопроникністю (наприклад хліб), періоду постійної швидкості сушіння (II) може і не бути.

Теоретично рівноважна вологість може бути досягнута лише при нескінченно великій тривалості сушіння; вологість, близька до рівноважної, досягається після закінчення деякого проміжку часу.

Якщо матеріал, висушений у сушарці до низької рівноважної вологості, помістити в умови з меншою температурою і великою відносною вологістю повітря, то в силу своїх гігроскопічних властивостей він може увібрати в себе вологу до більш високої рівноважної вологості, що відповідає цим новим умовам. Ця обставина має велике практичне значення, особливо для таких сильно гігроскопічних матеріалів, як цукор, текстиль, тютюн тощо. Недоцільно сушити матеріал до малої рівноважної вологості, якщо він надалі при транспортуванні, чи збереженні в поганій упаковці, може внаслідок гігроскопічних властивостей увібрати вологу з навколишнього середовища. Таким чином, кінцева вологість матеріалу при виході із сушарки повинна вибиратися в залежності від його призначення, умов транспортування і збереження. Рівноважні вологості для деяких матеріалів наведені в таблиці 1.1 [3].

Таблиця 1.1 – Рівноважні вологості у відсотках для деяких матеріалів в залежності від відносної вологості повітря для температури 25 °С.

Назва матеріалу	**Відносна вологість повітря, %**									**Примітка**
	10	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	
Бавовна	2,6	3,7	4,4	5,2	5,9	6,8	8,1	10,0	14,3	Тканина
Вовна	4,7	7,0	8,9	10,8	12,8	14,9	17,2	16,9	23,4	Моток
Шовк	3,2	5,5	6,9	8,0	8,9	10,2	11,9	14,3	18,8	—
Льон	1,9	2,9	3,6	4,3	5,1	6,1	7,0	8,4	10,2	Тканина
Целюлоза	–	4,0	5,8	–	6,3	—	7,8	—	10,5	—
Папір	3,0	4,2	5,2	6,2	7,2	8,3	9,9	11,9	14,2	—
Шкіра	5,0	8,5	11,2	13,6	16,0	18,3	20,6	24,0	29,2	Дублена
Гума	0,11	0,21	0,32	0,44	0,54	0,66	0,76	0,88	0,99	Шини
Дерево	3,0	4,4	5,9	7,6	9,3	11,3	14,0	17,5	22,0	—
Мило	1,9	3,8	5,7	7,7	10,0	12,9	16,1	19,8	23,8	—
Тютюн	5,4	8,6	11,0	13,3	16,0	19,5	25,0	33,5	50,0	Цигарки
Білий хліб	0,5	1,7	3,1	4,5	6,2	8,5	11,1	14,5	19,0	—
Борошно	2,6	4,1	5,3	6,5	8,0	9,9	12,4	15,4	19,1	—
Зерно	–	5,8	7,8	9,7	11,3	13,6	15,6	17,5		—

Як видно з рис. 2.1, тангенс кута нахилу дотичної до кривої сушіння в будь–якій її точці визначає швидкість сушіння в цій точці:

$$tg\Psi_2 = -\frac{dw}{d\tau} \approx -\frac{\Delta w}{\Delta \tau} = N,\ \%/год \qquad (2.6)$$

Найбільша швидкість сушіння буде в перший період – період постійної швидкості випаровування. При рівноважній вологості w_p кут Ψ_2 і швидкість сушіння дорівнюють нулю.

2.2 Криві швидкості сушіння

Тангенс кута нахилу дотичної до кривої сушіння в будь–якій її точці визначає швидкість сушіння (%/год):

$$tg\psi = -\frac{dW^c}{d\tau} = N. \qquad (2.7)$$

Криві швидкості сушіння будують методом графічного диференціювання за кривими сушіння.

Для рис. 2.1 крива швидкості сушіння матиме вигляд, показаний на рис.2.2.

Для аналізу процесів сушіння користуються поняттями інтенсивності I і швидкості сушіння N. В період постійної швидкості сушіння температура матеріалу постійна, $\frac{dt}{d\tau} = 0$ і якщо теплота, необхідна для випаровування вологи, відбирається з навколишнього повітря шляхом теплообміну конвекції, то інтенсивність випаровування I_m прямопропорційна швидкості потоку теплоти на поверхні тіла.

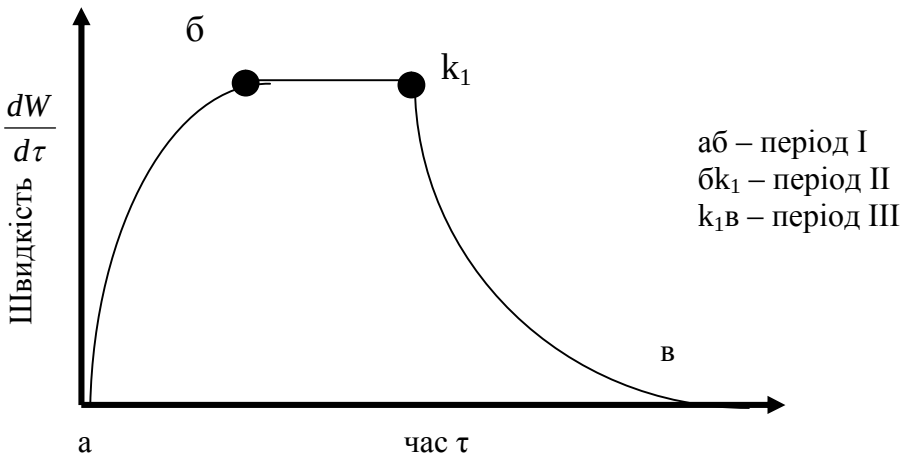


Рисунок 2.2 – Крива швидкості сушіння

Для різних випадків сушіння нараховують шість можливих форм зміни швидкості сушіння.

$$I_m = \frac{q}{r} = \frac{N_0}{100} R_v \rho_0 / r = \left(\frac{dW^c}{d\tau}\right)_0 \frac{R_v}{100} \cdot \frac{\rho_0}{r}\ , \qquad (2.8)$$

де: $N_0 = \left(\frac{dW^c}{d\tau}\right)_0$ – швидкість сушіння в періоді постійної швидкості, *%/год.*;

$R_v = \frac{V}{F}$ – відношення об'єму тіла до його площі, *м*;

ρ_0 – густина абсолютно сухого матеріалу, *кг/м*^{3};

r – теплота пароутворення, *кДж/кг*.

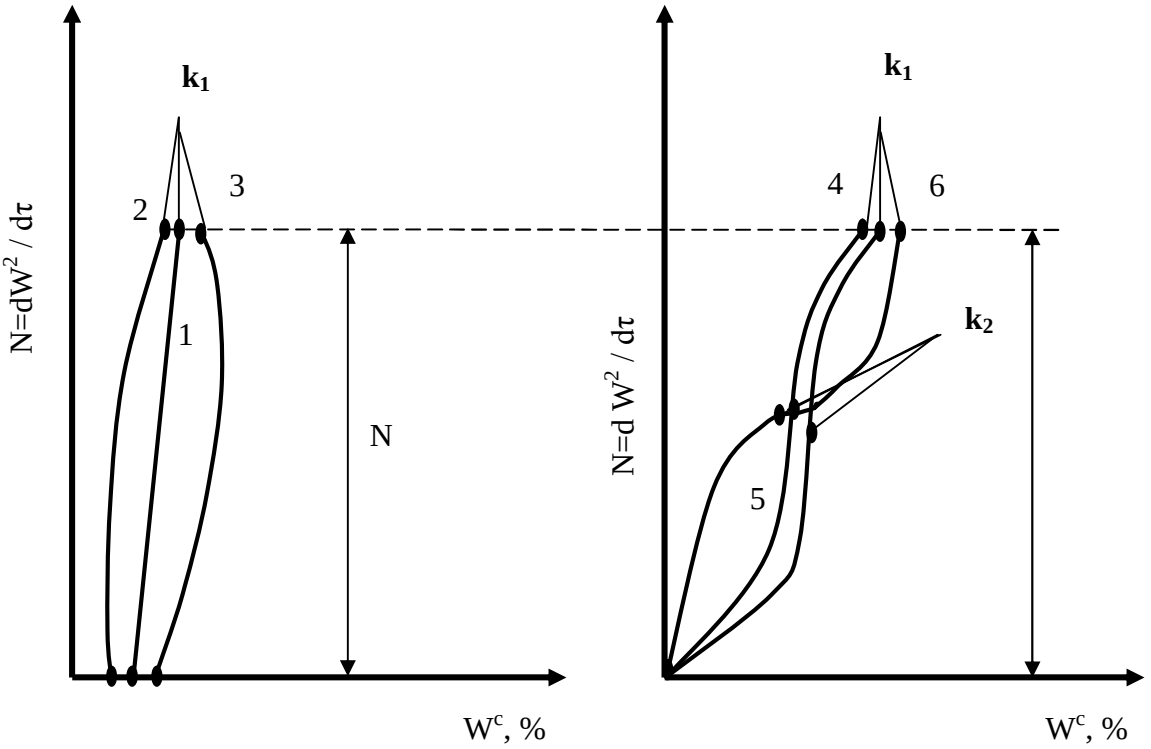


Рисунок 2.3 – Швидкості сушіння для різних типів матеріалів

1- капілярно–пористі тіла з великою поверхнею випаровування (папір, тонкий картон)
2- капілярно–пористі тіла з великою поверхнею випаровування (тонка шкіра, тканини), колоїдні тіла (крохмаль)
3- капілярно–пористі тіла з малою поверхнею випаровування – (кераміка)
4- капілярно–пористі тіла з малою поверхнею випаровування (пісок, глина, будматеріали)
5, 6– капілярно–пористі колоїдні тіла (зерно, хліб, торф).

З рівнянь 2.1, 2.4, 2.8 отримаємо:

$$\frac{\alpha}{r}(t_c - t_{i.a}) = \beta_?(?_{ian} - ?_n) = \frac{N_0 \rho_0 R_v}{100r}, \qquad (2.9)$$

де $t_{м.а}$ – адіабатна температура мокрого термометра.

Різниці $(t_c - t_{м.а})$ і $(P_{нас} - P_c)$ отримали назву *потенціалу сушіння*.

Залежність 1 (пряма лінія) можлива для тонких грубошерстих матеріалів. Крива 2 отримана для сушіння колоїдних тіл, що містять адсорбційну й осмотично зв'язану вологу. Крива 3 характерна для керамічних пористих тіл, що містять капілярну вологу. Ці три залежності не мають точок перегину. Криві 4,5 і 6 мають точки перегину, що визначають другу критичну вологість. Точка K_2 на кривій 4 вказує на поглиблення зони випаровування в матеріалі; ця точка не завжди ясно виражена; іноді вона збігається з точкою K_1 і тоді крива 4 має вид кривої 3. Крива 5 верхньою своєю частиною характеризує випаровування капілярної вологи, а нижньою частиною (після точки перегину) характеризує видалення сорбційно зв'язаної вологи. Крива 6 зустрічається рідко. Найчастіше зустрічаються типові криві швидкості сушіння 2, 3 і 5.

В процесі сушіння волога в матеріалі може переміщуватися до його

поверхні під дією різниці її концентрації, під впливом термовологопровідності і під дією градієнта надлишкового тиску, що виникає в матеріалі при високотемпературному сушінні, коли температура матеріалу $\vartheta_м \geq 100\ ^\circ C$ (фільтраційний перенос). Закон термовологопровідності, за яким волога в матеріалі переміщається в напрямку теплового потоку, а газ – в протилежну сторону, був відкритий А. В. Ликовим у 1934 р. П. Д. Лебедєв з аналізу експериментальних даних у 1952 р. довів, що при температурі матеріалу, близькій або більшій від 100°С, спостерігається фільтраційний перенос вологи, коли рушійною силою є градієнт тиску [4] .

У загальному вигляді рівняння переносу маси при сушінні матеріалу може бути записане в такий спосіб:

$$I_m = -a_m \rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} - \delta a_m \rho_0 \frac{\partial t}{\partial x} - a_p \rho_0 \frac{\partial p}{\partial x}, \qquad (2.10)$$

де I_m– кількість рідини, що перемістилася всередині тіла в одиницю часу через одиницю поверхні, названа густиною потоку рідини чи маси, *кг/(м²·год)*;

a_m – коефіцієнт потенціалопровідності, *м²/год*;

u – концентрація вологи, *кг/кг*;

x – координата, *м;*

ρ_0 – густина абсолютно сухого матеріалу, *кг/м³*;

δ – термоградієнтний коефіцієнт, *1/°С*;

a_p – коефіцієнт фільтраційного переносу, *м²/год*;

∂u/∂x, ∂t/dx і *∂p/∂x* – часткові похідні, пропорційні градієнтам вологості, температури і тиску *(∇U, ∇t,* і *∇p*) що виникають у матеріалі при сушінні.

Третій член рівняння (2.10) має значення рушійної сили переміщення вологи тільки для температур, близьких до 100°, або які перевищують 100°С, у матеріалі, котрий сушиться при атмосферному тискові. У низькотемпературних процесах він дорівнює нулю. Другий член цього рівняння, навпаки, при температурі близько 100°С і вище близький до нуля $(\delta \approx 0)$. Тому в низькотемпературних процесах сушіння при $t < 100\ ^\circ C$ рівняння має перші два члени, а при $t > 100^\circ C$ – перший і третій члени.

Майже всі матеріали в процесі сушіння змінюють свої розміри, що називається усадкою (squeezing) матеріалу в процесі сушіння. Наприклад, глина має усадку в період постійної швидкості сушіння, дерево і вугілля – у період падаючої швидкості сушіння, а торф, шкіра і деякі інші матеріали – протягом усього процесу сушіння.

Деякі матеріали, наприклад деревина, мають різні усадки в тангенціальному і радіальному напрямках, що різняться іноді в 1,5–2,5 раза, а також різні поперечну і подовжню усадки, що пояснюється їх фізико–хімічними властивостями чи анатомічною будовою (деревина тощо). Наближена формула для визначення лінійного розміру зразка після сушіння така:

$$l = l_0[1 + \alpha(w_{ii?} - w_{ei}], \quad (2.11)$$

де l– початковий лінійний розмір зразка;

l_0 – довжина зразка при кінцевій рівноважній вологості;

α – лінійний коефіцієнт усадки;

$\omega_{i\,i\,?}$ і ω_{ei} – початкова і кінцева рівноважні вологості зразка, %.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти усадки [3]

Назва матеріалу	**а**
Глина..……	0,007–0,0048
Підмосковне вугілля….....	0,0024
Фрезерний торф…….....	0,0012
Шкіра……	0,007

Лінійні коефіцієнти усадки показують, на яку частинку початкового лінійного розміру матеріалу скорочується відповідний розмір (довжина, ширина чи товщина) матеріалу при видаленні з нього 1% вологи.

Якщо усадка матеріалу відбувається тільки в період постійної швидкості сушіння, то під $w_{кн}$ варто розуміти ту вологість, при якій закінчується усадка. Під $w_{поч}$ варто розуміти ту вологість, при якій починається усадка. Формула правильна тільки для зразків з рівномірним розподілом вологи. Значення лінійного коефіцієнта усадки вказані в табл. 2.2.

Експериментально встановлено, що чим вища вологість, температура чи тиск всередині матеріалу, тим більшою є швидкість його сушіння.

Якщо температура чи вологість у поверхневих шарах матеріалу більша, ніж у внутрішніх, то переміщення вологи до поверхні матеріалу може навіть гальмуватися чи, навпаки, може виникнути зворотне переміщення вологи у внутрішні шари матеріалу. Відповідно до цього градієнти вологості, температури і тиску можуть мати як позитивний, так і від′ємний знак. Від’ємний знак показує, що напрямок вектора потоку вологи не збігається з напрямком градієнта і відповідає переміщенню вологи з внутрішніх шарів матеріалу до його поверхні.

Розтріскування багатьох матеріалів викликається неприпустимою величиною градієнта вологості, зв'язаного з напругами при усадці матеріалів у процесі їхнього сушіння. Чим менший градієнт вологості (різниця вологості в центрі і на поверхні) у матеріалі при його сушінні, тим вищою буде якість матеріалу, що висушується. Це необхідно завжди враховувати при розробці режиму сушіння. Градієнт температури гальмує переміщення вологи до поверхні матеріалу. Швидкість конвективного сушіння матеріалів без розтріскування лімітується градієнтом вологості, а швидке терморадіаційне сушіння (thermoradiatic drying) товстих матеріалів без розтріскування неможливе.

Для контактного і високочастотного сушіння температура всередині матеріалу вища, ніж на його поверхні. Переміщення вологи всередині матеріалу до його поверхні йде за рахунок градієнта температури; градієнт вологості гальмує процес.

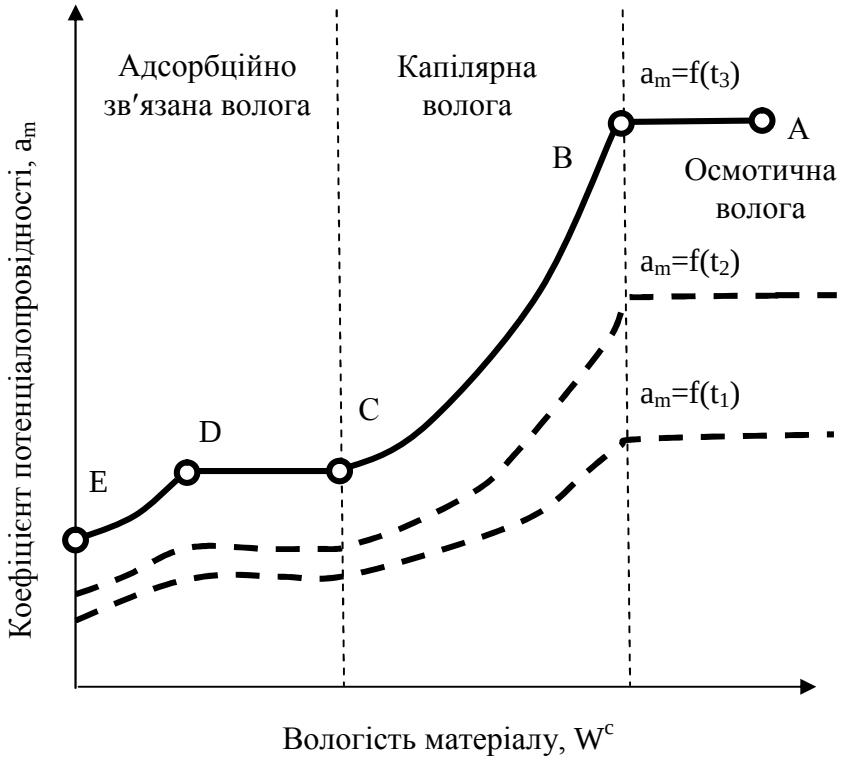


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнта потенціалопровідності a_m від вологості матеріалу

З рівняння (2.10) випливає, що інтенсивність сушіння визначається не тільки значеннями ∇U, ∇t, і ∇p, вона значною мірою залежить і від коефіцієнтів потенціалопровідності a_m і термоградієнтного коефіцієнта δ, а для високотемпературного сушіння і від a_p.

Коефіцієнти a_m і δ залежать від вологості, температури і структури матеріалу. За зміною значень a_m і δ в процесі сушіння можна судити про форми зв'язку вологи з матеріалом і механізми її переміщення.

На рис. 2.4 показана залежність коефіцієнта потенціалопровідності (conductivity of potential) a_m від вологості матеріалу для постійної його температури. Ділянка *AB* відповідає переміщенню осмотично і капілярно зв'язаної вологи у вигляді рідини, а ділянка *BP* – переміщенню вологи як у вигляді пари, так і у вигляді рідини. Ділянка *CD* – область вологи, зв'язаної полімолекулярною адсорбцією; переміщення вологи на цій ділянці відбувається тільки у вигляді пари. Ділянка *DE* відповідає переміщенню вологи, найбільш міцно зв'язаною мономолекулярною адсорбцією.

Залежність термоградієнтного коефіцієнта δ від вологості матеріалу (при його постійній температурі) показана на рис. 2.5.

Випаровування вологи в капілярах характеризується збільшенням δ (крива *DB)* за рахунок наявності в них затисненого повітря.

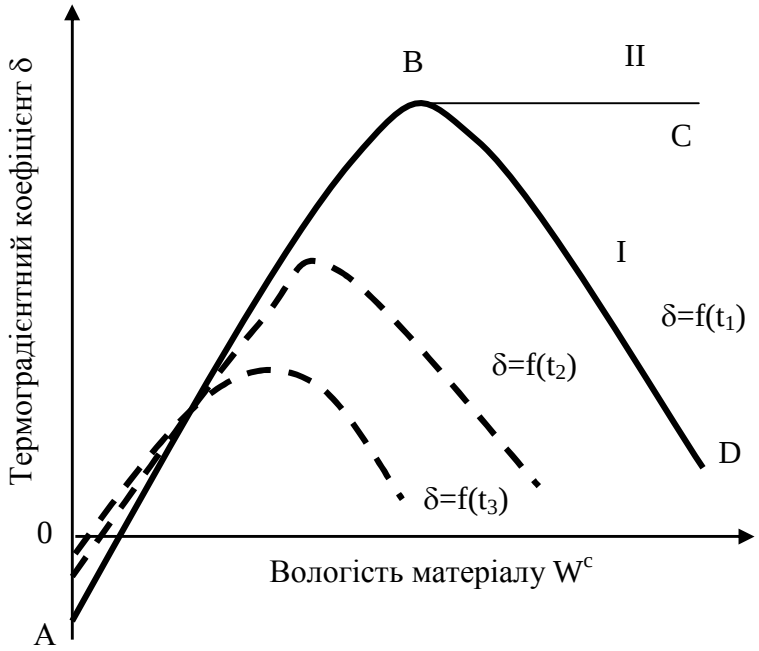


Рисунок 2.5 – Залежність термоградієнтного коефіцієнта δ від вологості матеріалу.

В капілярно–пористих тілах при малих вологостях термоградієнтний коефіцієнт δ стає від′ємним, тому що в цьому випадку волога внаслідок відносної термодифузії пари і повітря переміщається в зворотному напрямку – від холодних зон до гарячих.

На рис. 2.4 і 2.5 пунктирними лініями також показані криві a_m і δ для температур $t_3 > t_2 > t_1$, з розгляду яких випливає, що з підвищенням температури a_m збільшується, а δ зменшується.

Основними рівняннями для аналітичного визначення тривалості сушіння і прогріву матеріалу є рівняння вологопровідності і теплопровідності. Диференціальне рівняння термо–вологопровідності для температур матеріалу нижче 100°С для всіх способів сушіння має вигляд:

$$\partial u / \partial \tau = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t. \qquad (2.12)$$

Диференціальне рівняння теплопровідності відповідно до вивчення процесів сушіння в найзагальнішому вигляді може бути подане:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\nabla^2 t + \frac{q_v}{c_н \rho_0} - \frac{r_\varepsilon}{c_н}\frac{\partial u}{\partial \tau}, \qquad (2.13)$$

де q_v — внутрішнє джерело теплоти;

ρ_0 – густина сухого матеріалу;

$C_н$ – теплоємність вологого матеріалу;

r – теплота пароутворення;

ε – коефіцієнт внутрішнього випаровування вологи;

t – температура матеріалу;

a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу для його середньої вологості.

Аналітичне розв′язування рівнянь (2.12) і (2.13) можливе лише для постійних значень коефіцієнтів масопереносу і для деяких спрощених окремих випадків. В ряді випадків на основі диференціальних рівнянь процесів сушіння і відповідних їм граничних умов методом теорії подібності знаходять критеріальні співвідношення, що використовуються для обробки експериментальних даних

Знаючи характер зміни коефіцієнтів a_m і δ, можна за допомогою рівнянь (2.12) і (2.13) для відповідних початкових і граничних умов дати якісну характеристику процесу сушіння і зв′язати її з технологічним процесом.

Для кількісних розрахунків кінетики процесу сушіння існують наближені рівняння [3].

2.3 Температурні криві сушіння

Починаючи з першої критичної точки (рис.2.6) швидкість вологовіддачі зменшується, а температура матеріалу підвищується, коли вологість матеріалу досягає рівноважної вологості, температура його стає рівною температурі повітря t_c.

На початковій стадії прогріву температура матеріалу підвищується швидко досягаючи $t_м$, протягом II періоду сушіння температура поверхні залишається сталою. В цей період відбувається найбільш інтенсивна вологовіддача і вся теплота, що надходить до матеріалу, витрачається на випаровування вологи, матеріал не нагрівається і його температура рівна $t_м$.

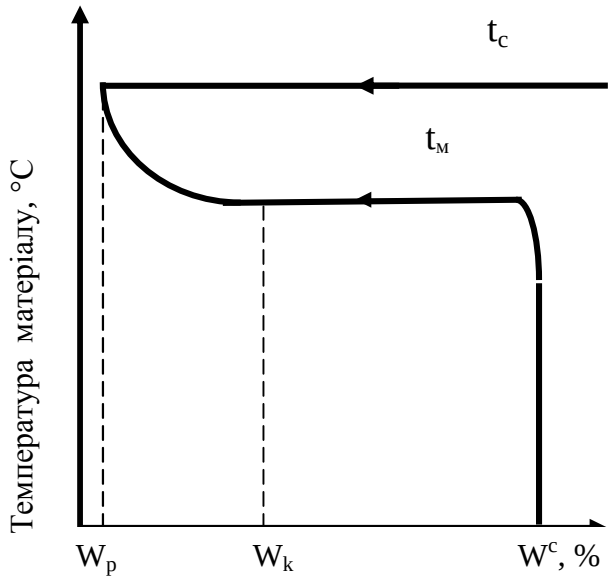


Рисунок 2.6 – Температурні криві сушіння

2.4 Ізотерми сорбції (persorbtion) і десорбції (desorbtion)

Взаємодія вологого матеріалу з навколишнім повітрям може проходити в двох напрямках.

1. Якщо парціальний тиск пари біля поверхні матеріалу $P_м$ більший парціального тиску пари в повітрі $P_п$ ($P_м > P_п$), то буде проходити процес випаровування (десорбція).
2. Якщо $P_м < P_п$, то матеріал буде зволожуватись за рахунок вбирання пари з навколишнього середовища (сорбція).

Через деякий час, коли $P_м = P_п$, наступить процес динамічної рівноваги. Вологість матеріалу, яка відповідає процесу динамічної рівноваги, називається рівноважною вологістю W_p.

Рівноважна вологість досліджується тензиметричним методом. Для цього зразок вологого матеріалу поміщають в стаканчик, який знаходиться в ексикаторі з розчином сірчаної кислоти відомої концентрації. Кожній концентрації сірчаної кислоти відповідає певна вологість повітря φ. Зразок періодично зважують, доки його вага не буде змінюватись (досягне рівноважної вологості). Повторюючи дослід при різних концентраціях H_2SO_4, тобто в середовищі з різною вологістю φ, отримують залежність: $W_p = ?(\varphi)$. Якщо вся серія дослідів проводиться при одній температурі, то графік в координатах φ і W називають *ізотермою*. Якщо крива отримана в результаті випаровування води з матеріалу, то крива називається *ізотермою десорбції*; якщо криву отримали в результаті зволоження матеріалу – *ізотерма сорбції*.

Виявлено, що ізотерми сорбції і десорбції не збігаються і спостерігається явище сорбційного гістерезису (рис.2.7). Гістерезис (hysteresis) свідчить про те, що якщо матеріал після сушіння знову зволожувати, то для отримання тої ж самої рівноважної вологості потрібно створити більш високу вологість повітря. Цією властивістю часто користуються, коли необхідно певний час протримати висушений матеріал в приміщенні з вищою вологістю.

Рівноважну вологість матеріалу, що відповідає вологості повітря φ=100% називають гігроскопічною. Її визначають на графіку ізотерми сорбції за точкою перетину ізотерм з лінією φ=100%.

2.5 Властивості води

Вода – (грецька назва – гідро, латинська – аква) – окис водню – найпростіше стійке з'єднання водню (11,19 мас%) з киснем (88,81 мас%), H_2O.

$T_{кип}$=100°C	$T_{плавл}$=0°C
Критична температура	374,15°C
Критичний тиск	22,11 МПа
Критична густина	325 кг/м^3

Найбільшу густину природна вода має при t=3,98°С.

Чиста вода може легко переохолоджуватись (–33°С) і перегріватись (+200°С при 0,1 МПа) за С. Вайзбергом [1].

При температурі 15, 30, 45, 60°С вода змінює деякі свої властивості стрибком. (наприклад в'язкість).

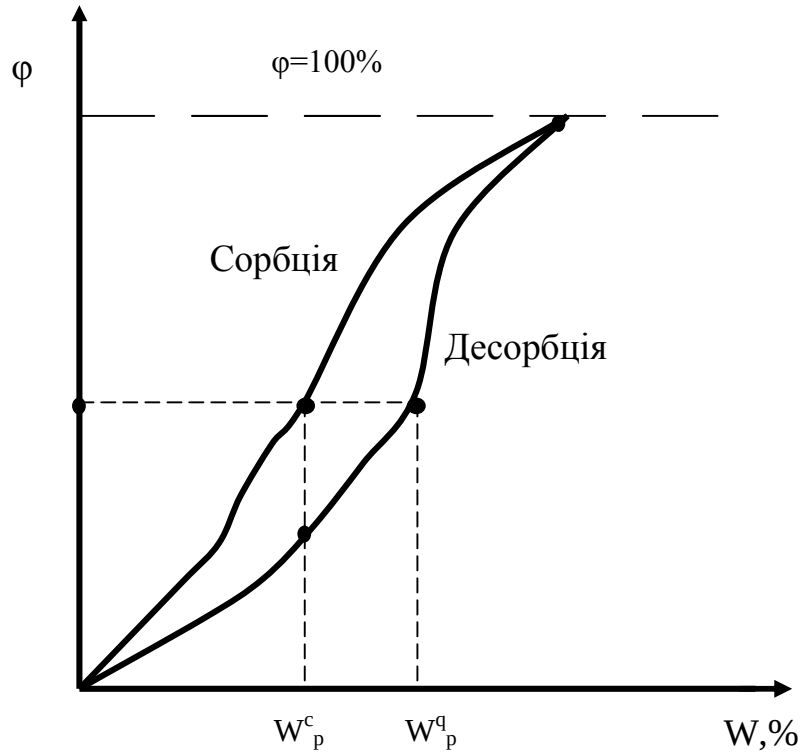


Рисунок 2.7 – Ізотерми сорбції і десорбції

3 ВОЛОГИЙ МАТЕРІАЛ

3.1 Основні поняття і означення

Більшість твердих матеріалів, які необхідно сушити, є капілярно–пористими тілами (capillaries of pore bodies), в порах яких знаходяться гази – повітря і пари рідини. Хоча об'єм, який займає газ, може бути значним, одначе маса газу, в порівнянні з масою твердого каркаса і рідини, не значна. Тому в сушильній техніці вважають, що вологі тіла складаються з абсолютно сухого матеріалу і вологи.

Стан вологого матеріалу визначається його температурою і вологістю. Властивості вологих матеріалів характеризується такими теплофізичними характеристиками, як питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт температуропровідності.

В теорії сушіння вологість матеріалу розраховується відносно маси абсолютно сухого матеріалу, яка в процесі сушіння залишається незмінною.

Загальна маса вологого матеріалу (в кг):

$$q=q_{вл}+q_{с.реч.} \tag{3.1}$$

Вологість матеріалу відносно маси сухої речовини: (в %)

$$W^c = \frac{q_{вл}}{q_{с.реч.}} \cdot 100 \ . \tag{3.2}$$

Вологість матеріалу відносно загальної маси:

$$W = \frac{q_{вл}}{q} \cdot 100 . \tag{3.3}$$

Формули переходу: $W^c = \frac{W^c}{100+W} \cdot 100$, $\quad W^c = \frac{W}{100 \cdot W^c} \cdot 100$

Якщо вологість матеріалу відносно маси сухої речовини виразити в *кг вологи/(кг сухої речовини)*, то отримаємо вологовміст (питомий масовміст) матеріалу:

$$u = \frac{q_{вл}}{q_{с.реч}} . \tag{3.4}$$

Якщо волога в матеріалі розподілена рівномірно, то :

$$W^c=100 \cdot u \quad \text{або} \quad u= W^c/100$$

Відповідно до початкової, критичної, рівноважної і кінцевої вологості W^n, $W^{кр}$, W^p, $W^к$ матеріалу розрізняють початковий U_n, критичний $U_{кр}$, рівноважний U_p і кінцевий $U_к$ вологовміст (на суху речовину).

Якщо відомі ці вологовмісти, просто розрахувати тривалість кожного періоду сушіння:

– для I періоду (постійна швидкість сушіння):

$$\tau_1 = \frac{1}{k}\left(U_n - U_{кр}\right) \tag{3.5}$$

– для II періоду сушіння (змінна швидкість сушіння)

$$\tau_2 = \frac{U_{кр} - U_p}{k} \ln \frac{U_{кр} - U_p}{U_к - U_p} \quad , \tag{3.6}$$

де k – коефіцієнт сушіння, який є числом кілограмів вологи, випаруваної за 1секунду, що приходиться на 1 кілограм сухої речовини.

Загальна тривалість сушіння $\tau = \tau_1 + \tau_2$

Наближене рівняння для певної тривалості сушіння має вигляд:

$$\tau = \frac{U_п - U_{кр}}{k} + \frac{U_{кр}}{k} \ln \frac{U_{кр}}{U_к} \quad . \tag{3.7}$$

Коефіцієнт сушіння k визначають або експериментальним шляхом, або через коефіцієнт масовіддачі:

$$k = \frac{W}{G_{сух} \cdot \tau} = \frac{F \cdot I\tau}{G_{сух} \cdot \tau} = \frac{F \cdot I}{G_{сух}} = \frac{F \cdot \beta_p \cdot (P_п - P_c)}{G_{сух}} = \frac{F \cdot \beta_p \cdot \Delta X}{G_{сух}}, \tag{3.8}$$

де F – площа;

ΔX – потенціал сушіння.

Коефіцієнт масовіддачі β_p визначається з критеріального рівняння:

$$Nu_r = A \cdot Re^n{}_r (Pr_r)^{0,33} Gu^{0,33}, \tag{3.9}$$

де: $Nu_r = \frac{\beta \ell}{D}$ – масообмінний критерій Нуссельта (критерій Шервуда);

$Re = \frac{\omega \ell}{\nu}$ – критерій Рейнольдса;

$Pr_r = \frac{\nu}{D}$ – масообмінний критерій Прандтля (критерій Шмідта);

$Gu = \frac{T_c - T_M}{T_c}$ – критерій Гухмана;

D – коефіцієнт дифузії в рівнянні Фіка: $I_k = -D_c \frac{\partial p}{\partial П}$ $[кг/(м^2 с)]$.

Визначальним розміром при обчислені Nu_r і Re_r є довжина поверхні випаровування l за напрямком руху сушильного агента.

Величини A і n в рівнянні залежать від критерію Рейнольдса (див. табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів А і п від критерію Рейнольдса

Re	A	n
1–200	0,9	0,5
200–6000	0,87	0,54
6000–70000	0,347	0,65

$$D_c = D_0 (T/273)^{1,8} \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right) = 2,2 \cdot 10^{-5} (T/273)^{1,8} \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right) \quad [кг/м^2 с], \tag{3.10}$$

де P – тиск суміші для даної температури, $Па$;

P_0 – барометричний тиск, $Па$.

Розрізняють коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці концентрацій, β_c *[м/с]* і коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці парціальних тисків $\beta_p \left[\frac{кг \text{ вологи}}{м^2 .с.Па} \right]$.

Зв'язок між ними: $\beta_p = \frac{\beta_c}{R_П T}$,

де $R_П = \frac{8314}{18}$, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$ – газова стала водяної пари;

T – температура, *К*.

Під концентрацією вологи в матеріалі *С* розуміють масу вологи, що приходиться на одиницю об'єму матеріалу (*кг/м*^{3})

$$C = u \cdot \rho_0$$

де ρ_0 – маса абсолютно сухої речовини в одиниці об'єму вологого матеріалу, *[кг.с.реч/м*^{3}*]*.

3.2 Класифікація форм зв'язку вологи в колоїдних капілярно–пористих матеріалах

Найбільш повну і просту класифікацію запропонував П. А. Ребіндер. Вона враховує як природу утворення різних форм, так і енергію їх зв'язку з матеріалом.

Згідно з класифікацією П. А. Ребіндера, всі форми зв'язку діляться на три великі групи:

3.2.1 Хімічний зв'язок

Хімічно зв'язана вода найміцніше зв'язана в матеріалі і її можна видалити тільки при хімічній взаємодії або при особливо інтенсивній термообробці (прокалюванні). При сушінні хімічно зв'язана волога не видаляється.

3.2.2 Фізико–хімічний зв'язок

Адсорбційно зв'язана волога. Така волога є рідиною, що утримується силовим полем на розвинутій поверхні матеріалу. Колоїдні матеріали мають дуже високу дисперсність частинок умовним радіусом ≈ 0,1–0,001 мкМ. Внаслідок такої дисперсності колоїдні тіла мають величезну внутрішню поверхню і, як наслідок, значну вільну поверхневу енергію, за рахунок якої і відбувається адсорбційне зв'язування води. Щоб із молекул об'єму утворити поверхню, необхідно затратити роботу, і вся ця робота перетворюється в надлишок вільної поверхневої енергії, яка характеризується поверхневим натягом τ.

Для видалення адсорбційної вологи її необхідно перетворити в пару, після чого вона може переміщуватись до зовнішньої поверхні тіла.

Осмотично утримана волога (волога набухання і структурна волога).

До цих видів вологи відносять як вологу, що знаходиться в замкнутих комірках (клітинах) – осмотичну, так і іммобілізаційну – структурну вологу, що захвачується в процесі застигання гелю (холодцю).

І волога набухання, і адсорбційна волога називається колоїдно зв'язаною вологою. Енергія для її видалення потрібна незначна. Осмотична волога за властивостями не відрізняється від звичайної води.

3.2.3 Фізико–механічний зв'язок

Волога макрокапілярів – пор середнім радіусом більшим 10^{-7}м. Рідина заповнює макрокапіляри лише при безпосередньому контакті з ними.

Волога мікрокапілярів – середній радіус пор менший 10^{-7}м. Рідина їх заповнює лише при контакті з водою, а й шляхом сорбції з вологого повітря.

Волога з фізико–механічним зв'язком видаляється з матеріалу найпростіше.

3.3 Класифікація твердих вологих матеріалів

На зв'язок вологи з матеріалом найбільший вплив мають дисперсність матеріалу і його фізико–хімічні властивості. Чим більша дисперсність, тим більше в матеріалі міцно зв'язаної вологи. Разом з тим, для пористих матеріалів велике значення має радіус капілярів. Чим він менший, тим меншим є тиск пари над меніском рідини і тим більше енергії необхідно затратити на видалення води з капілярів.

За колоїдно–фізичними властивостями А. В. Ликов запропонував всі тверді вологі матеріали розділити на три групи: капілярно–пористі, колоїдні і капілярно–пористі колоїдні тіла.

До *капілярно–пористих тіл* відносяться матеріали, в яких рідина в основному зв'язана капілярними силами: (вологий кварцовий пісок, будівельні матеріали, деревне вугілля тощо). В процесі обезводнення капілярно–пористі тіла стають крихкими і в висушеному стані можуть бути перетворені в порошок, вони мало стискаються і всмоктують будь–яку рідину, яка їх змочує. Для таких тіл капілярні сили значно перевищують сили тяжіння, тому вони повністю визначають розподіл рідини в тілі.

До *колоїдних тіл* відносяться матеріали, в яких більше адсорбційно зв'язаної і осмотично утриманої вологи (желатин, агар–агар, пресоване мучне тісто). При висушуванні колоїдні тіла значно стискаються, зберігаючи свою еластичність. Колоїдні тіла можна розглядати як квазікапілярно–пористі, в яких розміри молекул мають той порядок величини, що і в розмірів мікрокапілярів.

До *капілярно–пористих колоїдних тіл* відносять матеріали, в яких рідина має різні форми зв'язку (торф, деревина, шкіра, зерно тощо) які за структурою є капілярно–пористими тілами, а за природою – колоїдами. Для таких тіл характерними є властивості обох попередніх видів: стінки їх

капілярів еластичні і при контакті з рідиною набухають, а при висушуванні зморщуються. Більшість з цих матеріалів в сухому стані стають крихкими. Важливим є те, що природа утворення різних видів зв'язку вологи зумовлює механізм її видалення при сушінні. Для видалення адсорбційно зв'язаної вологи її необхідно всередині матеріалу перетворити в пару, для цього необхідно затратити теплоту. Волога набухання переміщується всередині матеріалу шляхом дифузії через стінки клітинок. Волога макро– і мікрокапілярів переміщується по капілярах.

3.4 Потенціал масопереносу, масоємність

Переміщення вологи в колоїдних капілярно–пористих тілах зумовлено присутністю в них градієнта потенціалу масопереносу. За потенціалом масопереносу можна судити про можливості перенесення вологи в матеріалі в порівнянні з якимось еталоном. За еталон прийнято вибирати фільтрувальний папір.

Узагальнений потенціал масопереносу:

$$Q_m = \frac{d_e \cdot 100}{d_{c.\max}}$$

d_e – вологовміст еталона для відповідної вологості;

$d_{c.\max}$ – максимальний сорбційний вологовміст зразка при φ=100%.

Потенціал масопереносу виражається в умовних масообмінних градусах: °*М*.

Для аналізу явищ масопереносу, аналогічно питомій теплоємності рідини (води), вводять поняття "питома масоємність" (вологовміст) u_m, яка приймається рівною $\frac{1}{100} d_{c.\max}$ $\left[\frac{\text{кг}}{\text{кг}\ ^\circ M}\right]$ і показує, скільки кілограм води може вмістити 1кг матеріалу при зміні потенціалу масопереносу на 1 масообмінний градус.

Оскільки для багатьох тіл залежність Q_m=?(d) є нелінійною, u_m змінюється із зміною масовмісту. Локальна (істинна) питома масоємність визначається графічним диференціюванням кривих Q_m=*?(d)*.

3.5 Теплоємність вологого матеріалу

Питома теплоємність вологого матеріалу $\left[\frac{Дж}{кг.к}\right]$ розраховується як середньозважена величина між теплоємністю сухої речовини матеріалу $C_{с.мат}$, і теплоємністю води $C_в$, яку беруть рівною 4,19 $\frac{кДж}{кг.к}$:

$$C_M = \frac{C_{с.мат} \cdot (100 - w) + C_в \cdot w}{100} = C_{с.мат} + \frac{C_в - C_{с.мат}}{100} \cdot w$$

Теплоємність сухого матеріалу більшості харчових продуктів складає 1250–1670 *Дж/(кг·К)*. Якщо теплоємність вологого матеріалу віднести до кілограма сухої речовини, то отримаємо приведену теплоємність з розмірністю $\left[\frac{Дж}{кг\ с.мат.к}\right]$

$$C_M^{пр} = \frac{C_{с.мат} \cdot (100 - w) + C_в \cdot w}{100 - w}.$$

3.6 Теплопровідність вологих матеріалів

Перенос теплоти в вологих матеріалах суттєво відрізняється від передачі теплоти в сухих:

- волога впливає на теплопровідність скелета тіла, в якому вона знаходиться;
- перенос теплоти зв'язаний з безпосереднім переносом вологи всередині матеріалу.

Теплота може передаватись також і конвекцією через пори, в яких знаходяться газ і рідина. Тому розрізняють істинну і еквівалентну теплопровідності.

Істинна є коефіцієнтом пропорційності в рівнянні Фур'є: $q = -\lambda \nabla T$.

Еквівалентна теплопровідність (ефективна) $\lambda_{екв}$ характеризує здатність матеріалу передавати теплоту всіма способами: $\lambda_{екв} + \lambda_{конд} + \lambda_{конв} + \lambda_{пром} + \lambda_{переносу\ вологи}$.

Для пористого матеріалу його можна розрахувати:

$$\lambda_{екв} = \lambda_1 \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)\psi V_1}{1 + (\psi - 1) \cdot V_2};$$

де λ_1, V_1 і λ_2, V_2 – коефіцієнти теплопровідності і об′єми твердої і газової (рідкої) фаз.

Коефіцієнт Ψ залежить від форми частинок.

Для сферичних: $\Psi = \frac{3\lambda_1}{2\lambda_1 + \lambda_2}$;

для циліндричних: $\Psi = \frac{5\lambda_1 + \lambda_2}{3\lambda_1 + \lambda_2}$;

для тонких пластин: $\Psi = \frac{\lambda_1 + 2\lambda_2}{3\lambda_2}$.

Для зернистих, порошкоподібних матеріалів (пісок, мука, зерно, цукор–пісок) можна користуватись формулою Богомолова:

$$\lambda_{ае а} = 3\pi\lambda_2 \ln\left(\frac{43 + 0{,}31I}{I - 26}\right),$$

де *П* – пористість матеріалу в відсотках.

3.7 Температуропровідність вологих матеріалів

Позначається a (коефіцієнт температуропровідності) ($м^2/с$) і визначає теплові інерційні властивості матеріалу. Він є відношенням коефіцієнта теплопровідності матеріалу до його об'ємної теплоємності.

Визначають температуропровідність вологих матеріалів за формулою:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

де λ – теплопровідність матеріалу, *Вт/(м·К);*

c – теплоємність матеріалу *Дж/(кг·К);*

ρ – густина, $кг/м^3$.

Це відношення можна розглядати як міру швидкості зміни температури одиниці об'єму тіла, коли через нього проходить тепловий потік, пропорційний коефіцієнту теплопровідності.

Чим вища температуропровідність, тим швидше проходить нагрівання і охолодження матеріалу. Коефіцієнт температуропровідності враховують при дослідженнях і розрахунках нестаціонарних процесів: нагрівання, випаровування, сушіння тощо.

4 РОЗРАХУНОК КОНВЕКТИВНИХ СУШАРОК З ОДНОКРАТНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ГАРЯЧОГО ПОВІТРЯ

Існує велика кількість типів і конструкцій сушильних установок, для яких у наступному розділі дається класифікація за різними ознаками, у тому числі і за способом підведення теплоти до сировини (конвективним, терморадіаційним і контактним).

Найбільше поширення в промисловості мають конвективні сушарки. Їм і буде надалі приділена найбільша увага.

4.1 Матеріальний баланс процесу сушіння

Кількість випаруваної з матеріалу вологи і кількість сухого і сирого продукту пов'язані рівнянням балансу сушіння.

Введемо такі позначення:

G_1 – кількість матеріалу, що надходить у сушарку, *кг/год*; G_2 – кількість висушеного матеріалу (після видалення частини вологи), *кг/год*; $G_{сух}$ – кількість абсолютна сухого матеріалу, з якого видалена вся волога (вільна і зв'язана), *кг/год*; $w°_1$ і w^c_1 – початкові вологості матеріалу на загальну й абсолютно суху масу, $w°_2$ і w^c_2 – кінцеві вологості матеріалу на загальну і абсолютно суху масу, %; W– кількість випаруваної вологи, *кг/год*.

Користуючись цими позначеннями, можна написати рівняння матеріального балансу продукту, що сушиться:

$$G_1 = G_2 + W\ . \tag{4.1}$$

Кількості вологи, що надійшла в сушарку із сирим матеріалом і тієї, що виходить із сушарки з висушеним матеріалом, рівні (кг/год):

$$W_1 = \frac{G_1 w_1^0}{100}, \tag{4.2}$$

$$W_2 = \frac{G_2 w_2^0}{100}, \tag{4.3}$$

Кількість випаруваної в сушарці вологи:

$$W = G_1 - G_2 = W_1 - W_2 = \frac{G_1 w_1^0 - G_2 w_2^0}{100}, \tag{4.4}$$

Кількість абсолютно сухої речовини:

$$G_{поо} = \frac{G_1(100 - w_1^0)}{100} = \frac{G_2(100 - w_2^0)}{100}, \tag{4.5}$$

звідки:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{100 - w_1^0}{100 - w_2^0}. \tag{4.6}$$

Розділивши члени рівняння (4.4) на G_1 і підставивши значення G_2/G_1 для вологості на загальну масу, одержимо:

$$\frac{W}{G_1} = 1 - \frac{G_2}{G_1} = 1 - \frac{100 - w_1^0}{100 - w_2^0} = \frac{w_1^0 - w_2^0}{100 - w_2^0}. \tag{4.7}$$

В результаті одержимо основне рівняння матеріального балансу

$$W = G_1 \frac{w_1^0 - w_2^0}{100 - w_2^0} = G_2 \frac{w_1^0 - w_2^0}{100 - w_1^0}. \quad (4.8)$$

Аналогічно можуть бути отримані рівняння матеріального балансу для умов, якщо буде задана вологість матеріалу на суху масу:

$$W = G_1 \frac{w_1^c - w_2^c}{100 + w_1^c} = G_2 \frac{w_1^c - w_2^c}{100 + w_2^c}. \quad (4.9)$$

Формули перерахунку однієї вологості в іншу мають вигляд:

$$w^c = \frac{w^0}{100 - w^0} 100\% \ , \quad (4.10)$$

$$w^0 = \frac{w^c}{100 + w^c} 100\% . \quad (4.11)$$

4.2 Витрата повітря і теплоти для випаровування 1 кг вологи

Напишемо рівняння матеріального балансу сушарки відповідно до позначень на рис. 4.1:

$$G_1 \frac{w_1}{100} + L_0 d_0 = G_2 \frac{w_2}{100} + L_2 d_2 \quad (4.12)$$

Приймаємо, що присмоктування і витікання повітря в сушильній системі відсутні, тобто $L_o = L_1 = L_2 = L$ = const.

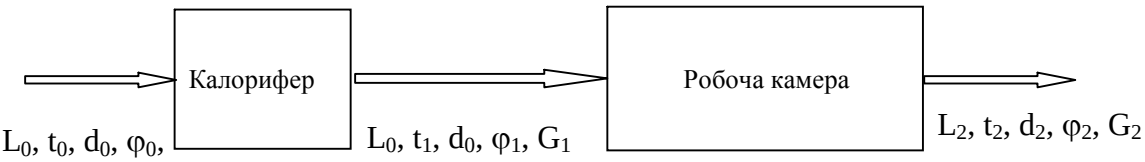


Рисунок 4.1 – Схема теоретичної сушарки

Перепишемо останнє рівняння у вигляді:

$$\frac{G_1 w_1 - G_2 w_2}{100} = L(d_2 - d_0). \quad (4.13)$$

Оскільки:

$$\frac{G_1 w_1 - G_2 w_2}{100} = W ,$$

рівняння (4.13) приймає вигляд:

$$W = L(d_2 - d_0). \quad (4.14)$$

Позначивши витрату повітря на 1 кг випарюваної вологи *L/W* через *l*, одержимо остаточний вираз для визначення витрати сухого повітря на 1 кг

випаруваної вологи:

$$l = \frac{1}{d_2 - d_0} \tag{4.15}$$

Тепер визначимо витрату теплоти на 1 кг випаруваної вологи. Якщо кожен кілограм сухого повітря нагрівається від t_0 до t_1, причому ентальпія його при цьому збільшується від h_0 до h_1, а для випаровування 1 кг вологи необхідно затратити l м^3 сухого повітря, то витрата теплоти на його нагрівання:

$$q = l(h_1 - h_0) = \frac{h_1 - h_0}{d_2 - d_0} \tag{4.16}$$

У цих формулах вологовміст повітря d, має розмірність: кг вологи/кг сухого повітря.

4.3 Розрахунок теоретичної сушарки за допомогою h–d діаграми

Теоретичною сушаркою називають уявну сушарку з попереднім підігрівом сушильного агента, в якій відсутні втрати теплоти в навколишнє середовище, на нагрів транспортних пристроїв і матеріалу, що сушиться, а температура матеріалу на вході і виході з сушильної камери дорівнює 0^0C (рис.4.2).

Тепловий баланс сушильної камери можна записати:

$$L_0 h_0 + Q_k = L_1 h_1 = L_2 h_2 \tag{4.17}$$

де h_0 – ентальпія вологого повітря, що поступає в підігрівник,
h_1 – ентальпія вологого повітря після підігрівника на вході в сушарку,
h_2 – ентальпія вологого повітря за сушаркою,
Q_k – кількість теплоти, що надходить у повітря в підігрівнику.

Для $L_0 = L_1 = L_2 = const$ маємо рівність $h_1 = h_2 = const$, яка показує, що в теоретичній сушарці процес сушіння йде при постійній ентальпії вологого повітря.

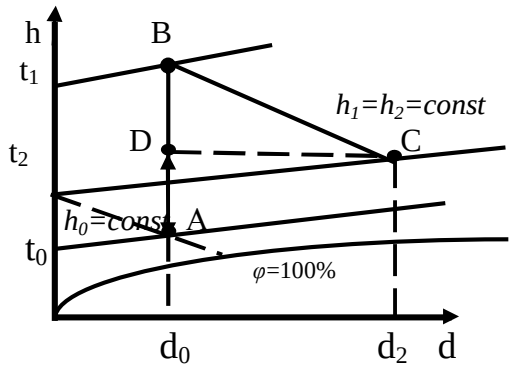


Рисунок 4.2 – Процес в теоретичній сушарці на h–d – діаграмі

Лінія АВ відповідає підігріву повітря в калорифері від температури t_0 до температури t_1, процес сушіння – затрата теплоти на випаровування вологи і вологообмін між повітрям і матеріалом, що висушується, йде по лінії $h=const$ і зображується відрізком ВС.

Витрати повітря в теоретичній сушарці (кг/кг вологи):

$$\ell = \frac{1}{d_2 - d_0} \tag{4.18}$$

Витрата теплоти в калорифері на 1 кг випаруваної вологи:

$$q = \frac{h_1 - h_0}{d_2 - d_0} \tag{4.19}$$

Витрата теплоти на підігрів повітря:

$$q = \ell(h_1 - h_0) = \ell(h_2 - h_0) \tag{4.20}$$

$$h_2 = c_2 t_2 + d_2 h_2 \qquad h_0 = c_0 t_0 + d_0 h_0 \tag{4.21}$$

де: d_2 і d_0 – вологовмісти сушильного агента;
h_1і h_0 – ентальпії водяної пари, що містяться в повітрі.

Вважаємо, що теплоємність сухого повітря не залежить від температури: $c_2=c_0=c_n$. Підставимо в (4.20), отримаємо:

$$q = \ell(c_n t_2 + d_2 h_2) - \ell(c_n t_0 + d_0 h_0) \tag{4.22}$$

Добавивши в праву частину ($\ell d_0 h_2 - \ell d_0 h_2$) і пам'ятаючи, що $\ell = \frac{1}{d_2 - d_0}$ отримаємо:

$$q = \ell c_n (t_2 - t_0) + \ell d_0 (h_2 - h_0) + h_2 \tag{4.23}$$

Із (4.23) видно, що в теоретичній сушарці є такі види теплоти:

- $q_1=h_2$ – витрата теплоти на випаровування вологи з матеріалу;
- $q_2=\ell c_n(t_2 - t_0)$ – втрати теплоти сушильним агентом, що входить в сушарку з температурою t_0 і виходить з сушарки з температурою t_2.
- $q_3=\ell d_0(h_2 - h_0)$ – втрати теплоти внаслідок збільшення ентальпії транзитної вологи, яка міститься в повітрі на вході в сушарку.

4.4 Розрахунок дійсної сушарки

В дійсній сушарці мають місце додаткові втрати і підведення теплоти: нагрів повітря в проміжних калориферах, тепловиділення в хімічних реакціях, розморожування вологи, нагрів сушильного агента вентилятором.

Складові теплового балансу сушарок періодичної дії відносять до окремих періодів сушіння $\left[\frac{кДж}{період}\right]$, а для сушарок неперервної дії – до 1години роботи *[кДж/год]*.

Таблиця 4.1 – Тепловий баланс дійсної сушарки для літнього часу

	Прихід	Витрата
Теплота, що поступає з повітрям	$L_0 h_0 + Q_{пв}$	$L_2 h_2$
Теплота, що поступає з матеріалом	$C_w W \theta_1 + G_2 C'_M \theta_2$	$G_2 C''_M \theta_2$
Теплота з транспортними пристроями	$G_{тр} C_{тр} \theta'_{тр}$	$G_{тр} C_{тр} \theta''_{тр}$
Нагрів в проміжних нагрівниках	$Q_{дод}$	—
Втрати в навколишнє середовище	—	Q_5

де $Q_{пв}$ – теплота, отримана повітрям перед сушаркою.

Для складання теплових балансів сушарок враховують тепловиділення від вентиляторів, яке додають в залежності від схеми сушіння до $Q_{пв}$ або до $Q_{дод}$. Теплота на прогрів сушильних камер неперервної дії дорівнює нулю.

4.4.1 Рівняння теплового балансу дійсної сушарки

Складемо рівння теплового балансу дійсної сушарки на піставі таблиці 4.1

$$Q_{П.В.}+L_0h_0+C_wW\theta_1+G_2C'_M\theta_1+G_{тр}C_{тр}\theta'_{тр}+Q_{дод}=L_2h_2+G_2C''_M\theta_2+G_{тр}C_{тр}\underline{\theta}''_{тр}+Q_5$$

Віднесемо витрату теплоти до 1кг випаруваної вологи:

$$l(h_1-h_0)=q=l(h_2-h_0)+q_м+q_{тр}+q_5-q_{дод}-Q_1C_w$$

де: $l(h_2-h_0)$ – витрата теплоти в теоретичній сушарці;

$q_м=\frac{G_2C_2}{W}(\theta_2-\theta_1)$ – витрата теплоти на нагрів матеріалу;

$q_{тр}=\frac{G_{тр}C_{р\,тр}}{W}(\theta''_{тр}-\theta'_{тр})$ – витрата теплоти на нагрів транспортерів;

$q_5=\frac{Q_5}{W}=\frac{\Sigma Fk\Delta t}{W}$ – витрати теплоти в навколишнє середовище;

$q_{дод}=\frac{Q_{дод}}{W}$ – добавка теплоти від калориферів в сушарці;

Q_1C_w – теплота, що поступає з навколишнім повітрям.

Отримаємо:

$$\Delta=l(h_2-h_1)=q_{дод}+Q_1C_w-(q_м+q_{тр}+q_5)\ \ [кДж/кг\ вологи] \qquad (4.24)$$

Це рівняння являє собою внутрішній тепловий баланс сушарки, без врахування ролі повітря як теплоносія.

Коли працює дійсна сушарка можливі три випадки:

1. $\Delta=0$, тоді:

$$q_{дод}+Q_1C_w=q_м+q_{тр}+q_5$$

Втрати теплоти компенсуються кількістю додатково введеного теплоти, тут $\Delta=l(h_2-h_1)=0$. Оскільки $l\neq0$ то $h_2-h_1=0$, а $h_2=h_1=const$ – процес сушіння йде з постійною ентальпією, як в теоретичній сушарці.

2. $\Delta<0$, тоді:

$$q_{дод}+Q_1C_w<q_м+q_{тр}+q_5,$$

тобто $\Delta=l(h_2-h_1)<0$ і, відповідно, $h_2<h_1$.

3. $\Delta>0$, тоді:

$$q_{дод}+Q_1C_w>q_м+q_{тр}+q_5,$$

тобто $\Delta=l(h_2-h_1)>0$ і, відповідно, $h_2>h_1$.

У зимовий час витрата теплоти на нагрівання матеріалу збільшується, тому що частина вологи в матеріалі знаходиться в замерзлому стані. Дослідами ВТІ встановлено, що в матеріалі замерзає тільки вільна волога, а зв'язана залишається в переохолодженій рідкій фазі. Наприклад, у підмосковному вугіллі замерзає волога понад 22%, у фрезерному торфі – 33% і у дереві 28 – 30% вологості на суху масу.

Розморожування вимагає додаткової витрати теплоти на підігрів льоду до 0°С и танення (перетворення його у воду) з тією ж температурою. Тому в таких випадках вказане вище значення $q_m = \frac{G_2 c_m}{W}(\theta_2 - \theta_1)$ варто збільшити на

$$q_m = \frac{W'}{W}(334 + 2.1\theta_1), \qquad кДж/кг\ вологи, \qquad (4.25)$$

де $W' = \frac{[w_1^c - (w_1^c)']}{100 + w_1^c}$ – кількість вологи, що замерзла;

$(w_1^c)'$ – вологість матеріалу, нижче якої волога не замерзає і вище якої вся волога (вода) знаходиться в стані льоду.

Втрати теплоти в навколишнє середовище огородженнями камери (стінами, стелями, підлогою, через дверні прорізи) визначаються аналітично за формулою теплопередачі

$$q_5 = \sum Fk\Delta t / W \qquad (4.26)$$

Для визначення витрати теплоти на сушіння необхідно враховувати, крім втрат теплоти огородженнями, також втрати теплоти внаслідок газопроникності стін і нещільності огороджень. Ці втрати називають неорганізованим повітрообміном і вони не піддаються розрахунку. У камерних лісосушарках, де сушіння відбувається при високій вологості сушильного агента, вони можуть доходити до 20 – 30% загальної витрати теплоти на сушіння.

Розрахунки сушарок періодичної дії більш складні і громіздкі. Розгляд їх виходить за рамки даного курсу.

4.4.2 Побудова процесу для дійсної сушарки на h–d–діаграмі

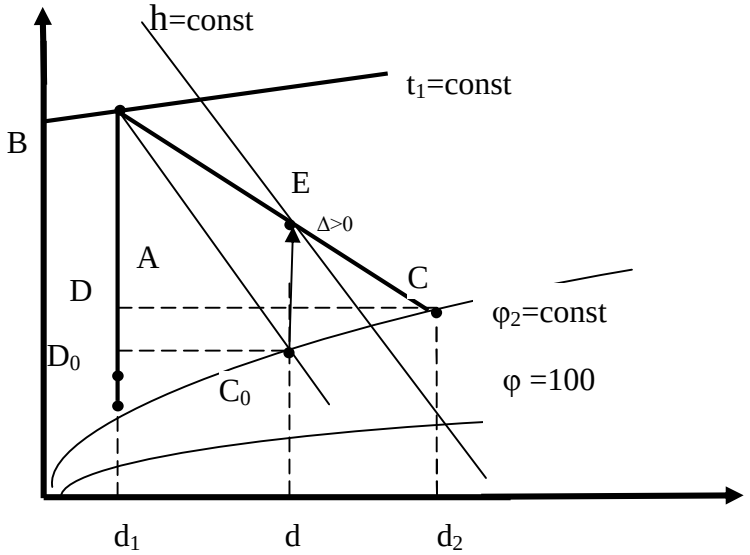


Рисунок 4.3 – Процес сушіння в дійсній сушарці

Побудова процесу в дійсній сушарці, якщо є теплові втрати, починається з побудови теоретичного процесу. Потім на лінії $h_1=const$ теоретичного процесу вибирається довільна точка C_0 і відкладається відрізок C_0E в напрямку $d=const$; причому величина $C_0E=D_0C_0 \cdot \Delta/m$ – де m – масштаб діаграми.

Якщо $\Delta<0$ – відрізок C_0E відкладаємо вниз, якщо $\Delta>0$ – вверх. Точку E з'єднуємо з точкою В прямою ВЕ, продовжуючи її до перетину із заданою температурою вихідного повітря, або з заданою вологістю вихідного повітря. Процес зобразиться лінією DB – (підігрів) і BC – (сушіння). Побудувавши процес можна знайти: l – витрату повітря *(кг/кг)* і $q_{кал}$ – витрату теплоти в калорифері, ($\frac{кДж}{кг}$).

$$l = \frac{1}{d_2 - d_0} \tag{4.27}$$

$$q_{кал}=l(h_1-h_0) \tag{4.28}$$

5 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ СХЕМ КОНВЕКТИВНИХ СУШАРОК

5.1 Сушарка з додатковим підігрівом повітря в сушильній камері

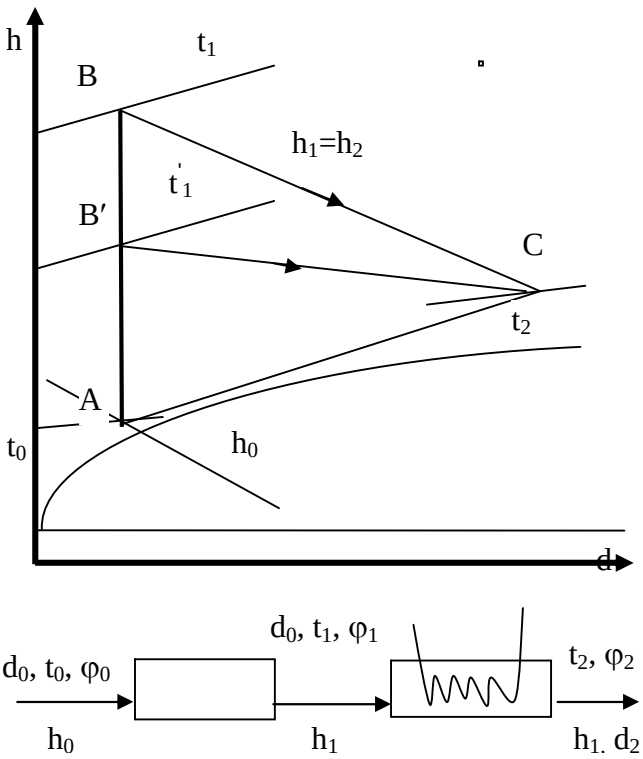


Рисунок 5.1 – Побудова процесу сушіння з додатковим підігрівом

Бувають випадки сушіння термолабільних матеріалів, особливо тих, що погано віддають вологу, коли висока початкова температури сушіння неприпустима (розпадається висушуваний матеріал), а час сушіння подовжувати не вигідно. Тоді використовують процес сушіння з додатковим підігрівом у сушильній камері, а початкова температура сушіння може бути меншою. Хоча потенціал сушіння (t_c – $t_м$) зменшується, зате якість сушених продуктів більша. Для простоти розглянемо теоретичний процес сушіння.

Задані початкові і кінцеві параметри процесу сушіння.

Якщо додаткового підігріву немає, то процес сушіння йтиме як в теоретичній сушарці по лінії АВС, а додаткова кількість теплоти $q_д=0$.

Витрата повітря на сушіння визначається: $l = \frac{1}{d_2 - d_0} = \frac{1000}{CD \cdot} \frac{кг}{кг}$, а витрата теплоти в калорифері

$$q_K = q_{заг} = \frac{h_2 - h_0}{d_2 - d_0} = \frac{AB}{CD} \quad \frac{кДж}{кг \cdot вол.}.$$

При нагріві повітря в калорифері до більш низької температури t'_1 процес сушіння піде по лінії B′C′, і щоб попасти в точку С необхідно підвести додаткову кількість теплоти $q_{дод}$ в самій сушарці.

Витрата теплоти в калорифері визначається:

$$q_K = \frac{h'_2 - h_0}{d_2 - d_0} = \frac{AB'}{CD} \quad \frac{кДж}{кг \cdot вол.}.$$

а загальна витрата теплоти не зміниться, бо матеріал потрібно висушити за один і той же час, причому кінцеві і початкові параметри повітря задані.

$$q_{заг} = q_K + q_Д = \frac{h_2 - h_0}{d_2 - d_0} = \frac{AB}{CD}.$$

тоді додаткову витрату теплоти можна знайти за формулою:

$$q_g = \frac{B'B}{CD} = \frac{h_2 - h'_2}{d_2 - d_0}.$$

Якщо вся теплота підведеться в сушильній камері, то процес сушіння піде по лінії *AC*. Однак цей процес неекономний, бо температура повітря низька, перепад температур малий, малим є потенціал сушіння і волога погано випаровується. Загальна витрата на один кілограм випарuваної вологи така ж, як і в сушарці без додаткового підігріву.

5.2 Сушарка з проміжним підігрівом повітря

В таких сушарках можна значно знизити температуру сушильного агента, режим сушіння годиться для сушіння термочутливих матеріалів, а рівномірність висихання набагато більша. В них робоча камера ділиться на ряд зон. Повітря після першої зони направляється в підігрівник, як і після другої, третьої тощо.

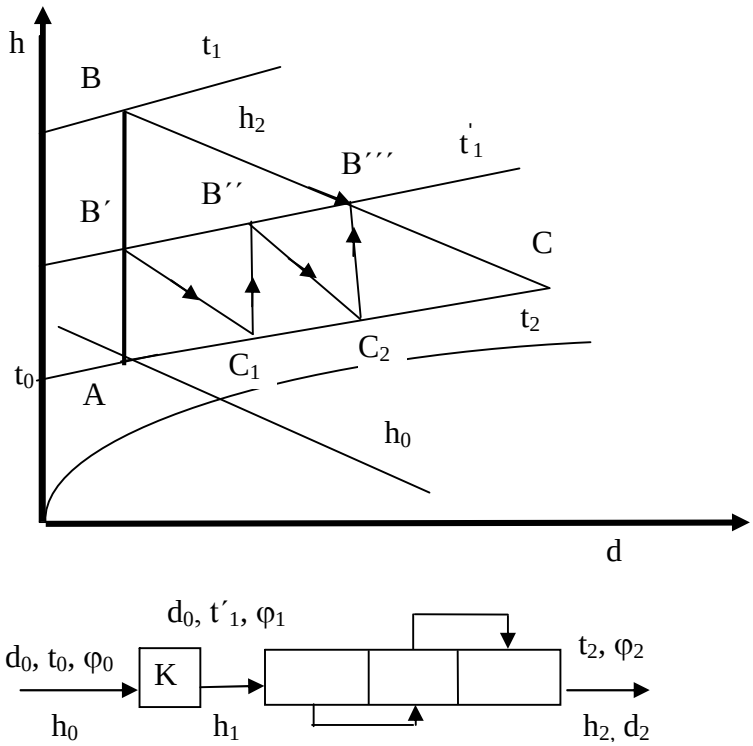


Рисунок 5.2 – Побудова процесу сушіння з проміжним підігрівом

Процес сушіння зображується ламаною $AB'C_1B''C_2B'''C$.

Відрізки AB', C_1B'', C_2B''' – процеси підігріву повітря в проміжних калориферах, а $B'C_1$,$B''C_2$, $B'''C$ – процеси сушіння в окремих робочих зонах. Процеси ABC і $AB'C_1B''C_2B'''C$ за кількістю підведеної теплоти однакові, але в другому процесі температура підведеного повітря нижча.

Для проектування сушарок з проміжним підігрівом бажано, щоб точки B', B'', B'''; C_1, C_2, C лежали на лініях однакових потенціалів сушіння. Всі

проміжні температури можна вибирати довільно, в залежності від конструкції сушарки і температури сушіння.

Загальна витрата сухого повітря однакова для всіх зон сушарки: $L=l_1W_1=l_2W_2=l_3W_3$.

Питома витрата повітря:

$$l = \frac{1}{(d_1 - d_0) + (d_2 - d_1) + (d_3 - d_2)} = \frac{1}{d_3 - d_0}.$$

Витрата теплоти на сушіння:

$$q = \frac{(h_1 - h_0) + (h_2 - h_1) + (h_3 - h_0)}{(d_1 - d_0) + (d_2 - d_1) + (d_3 - d_2)} = \frac{h_3 - h_0}{d_3 - d_0}.$$

Для розрахунку таких сушарок виникає необхідність правильного вибору кількості видаленої вологи по зонах. Це, як правило, робиться шляхом підбору, хоча є точний аналітичний розрахунок.

Будуємо в *h–d* діаграмі процес сушіння. Визначаємо витрату повітря по зонах:

$$l_1 = \frac{1}{d_1 - d_0}; \quad l_2 = \frac{1}{d_2 - d_1}; \quad l_3 = \frac{1}{d_3 - d_2}.$$

Позначимо кількість випаруваної вологи в зонах: W_1, W_2, W_3.

Загальна витрата повітря: $L = l_1 \cdot W_1 = l_2 \cdot W_2 = l_3 \cdot W_3$. Для розрахунку кількості випаруваної по зонах вологи використовують таке співвідношення:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{d_2 - d_1}{d_1 - d_0} = x_2; \quad \frac{W_3}{W_1} = \frac{l_1}{l_3} = \frac{d_3 - d_2}{d_1 - d_0} = x_3 \text{ або } \frac{W_2 + W_3}{W_1} = x_2 + x_3.$$

$$\frac{W_1 + W_2 + W_3}{W_1} = 1 + x_2 + x_3.$$

Загальна кількість випаруваної вологи:

$$W = W_1 + W_2 = W_3.$$

Тоді:
$$\frac{W}{W_1} = 1 + x_2 + x_3 \Rightarrow W_1 = \frac{W}{1 + \frac{d_2 - d_1}{d_1 - d_0} + \frac{d_3 - d_2}{d_1 - d_0}} = \frac{W}{1 + \frac{d_3 - d_1}{d_1 - d_0}}.$$

Визначивши W_1 визначаємо:

$$W_2 = W_1 \cdot x_2 = W_1 \cdot \frac{d_2 - d_1}{d_1 - d_0};. \qquad W_3 = W_1 \cdot x_3 = W_1 \cdot \frac{d_3 - d_2}{d_1 - d_0}$$

5.3 Сушарка з частковою рециркуляцією

В сушарках з рециркуляцією температуру процесу можна брати нижчу ніж на продув, а вологість в сушильній камері можна регулювати. В цих сушарках частина відпрацьованого повітря з параметрами h_2, d_2, t_2 повертається в робочу камеру, де змішується зі свіжим повітрям.

Утворена суміш (М) з параметрами d_{CM}, h_{CM} поступає в калорифер, де

підігрівається до температури t'_1 і входить в сушарку. Частина відпрацьованого повітря викидається в атмосферу. В суміші на кожен 1 *кг* свіжого повітря припадає *n* кг відпрацьованого з параметрами h_2 і d_2.

На діаграмі процес сушіння зображується лінією АМВ′С. Точки А, М, С повинні лежати на одній прямій. Положення точки М визначається параметрами: $h_{CM} = \frac{h_0 + nh_2}{1+n}; d_{CM} = \frac{d_0 - nd_2}{1+n}$ З цих умов визначається коефіцієнт рециркуляції:

$$n = \frac{h_{CM} - h_0}{h_2 - h_{CM}}; \quad n = \frac{d_{CM} - d_0}{d_2 - d_{CM}}.$$

який показує, яка кількість відпрацьованого повітря приходиться на 1 кг свіжого.

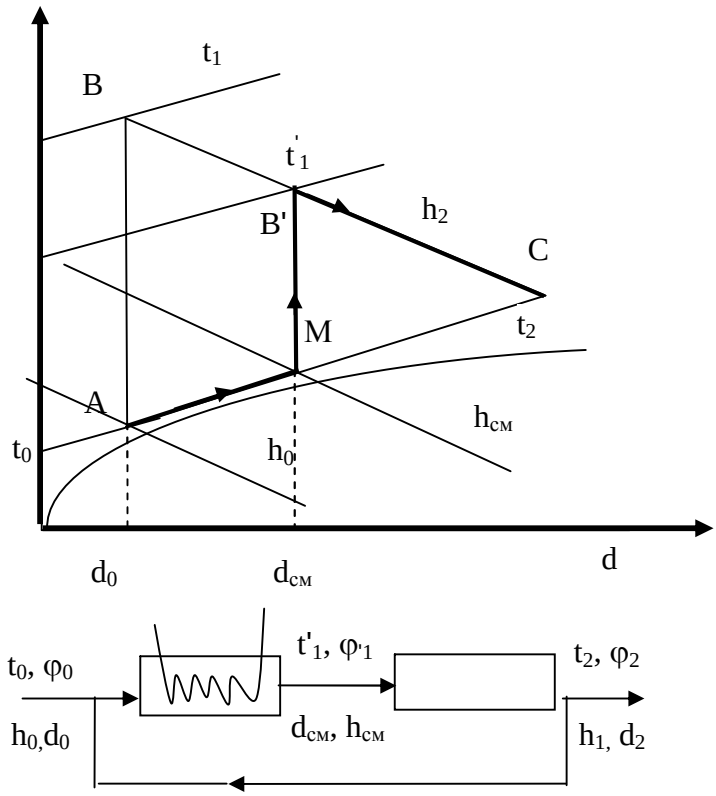


Рисунок 5.3 – Побудова процесу сушіння
з частковою рециркуляцією

Витрата свіжого повітря: $l_{СВ.П.} = \frac{1}{d_2 - d_0}$

Витрата повітря, що циркулює в сушарці: $l_ц = l_{СВ.П.}(1+n)$ $\frac{кг}{кг \cdot вологи.}$.

Або за діаграмою: $l_Ц = \frac{1}{d_2 - d_{CM}}$.

Слід пам′ятати, що повернення відпрацьованого повітря збільшує масу циркулюючого повітря, тобто, навантаження на вентилятор.

Витрата теплоти: $q_K = \dfrac{h_2 - h_0}{d_2 - d_0}$ *або* $q_K = \dfrac{h_2 - h_{CM}}{d_2 - d_{CM}}$.

5.4 Сушарка із замкненою циркуляцією

В такій сушарці витрати теплоти більші, ніж в сушарці з рециркуляцією. Крім того, необхідна установка додаткового обладнання (конденсатор і насос для видалення вологи). Однак, сушарки із замкненою циркуляцією часто використовують в хімічній промисловості для сушіння продуктів, що містять леткі речовини. Для конденсації деяких парів конденсатор замінюють адсорбентами.

Процес сушіння в такій сушарці проходить без повітрообміну.

Відпрацьоване повітря виходить із сушарки і поступає в поверхневий конденсатор, де охолоджується до стану насичення. При зниженні температури від t_2 до t_1, виділяється волога $d_2 - d_1$, яка видаляється з конденсатора насосом через конденсатовідвідник. Потім повітря знову подається на підігрів і в сушарку.

Кількість повітря, яке циркулює в робочій камері сушарки:

$$l_ц = \frac{1}{d_2 - d_1} = \frac{кг}{кг \cdot вологи}$$

A_1B – підігрів повітря в калорифері; BC – сушіння; CFA_1 – охолодження в конденсаторі.

Витрата теплоти: $q_K = \dfrac{h_2 - h_1}{d_2 - d_1}$ $\dfrac{кДж}{кг \cdot вологи}$.

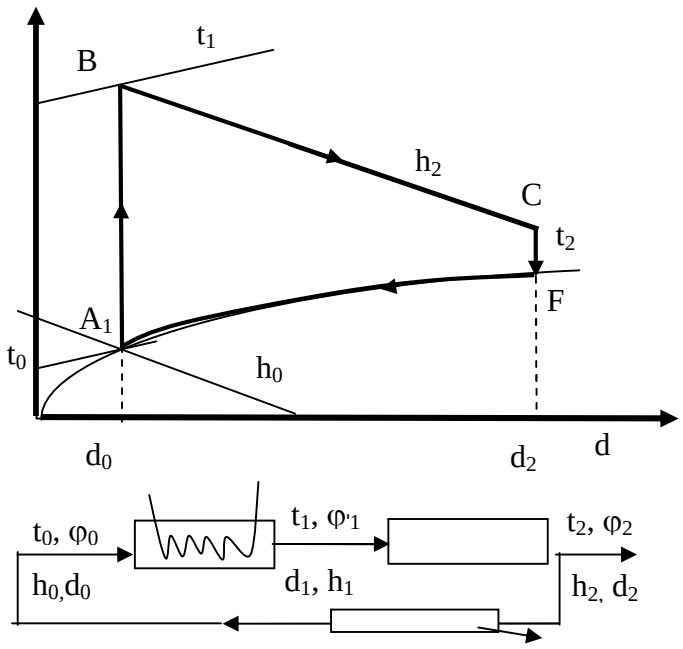


Рисунок 5.4 – Побудова процесу сушіння
із замкненою циркуляцією

6 ОСНОВНІ ТИПИ І КОНСТРУКЦІЇ СУШАРОК

6.1 Основні принципи конструювання та експлуатації сушильної техніки

Головні вимоги до сушильних установок – забезпечення рівномірного сушіння та отримання високоякісної продукції у всьому об′ємі сушильної камери при високих техніко–економічних показниках: мінімальних габаритах та мінімальних витратах матеріалів на побудову сушарки, мінімальних витратах теплоти та електроенергії на висушування одного кілограма сировини, простому обслуговуванні, ремонті обладнання. Рівномірність сушіння є одним з основних факторів, що характеризують сушильну установку, особливо для установок, призначених для сушіння матеріалів, в яких початкова вологість може змінюватись в широких межах (зерно). Важливою вимогою є можливість висушування партій сировини з різною вологістю за один прохід. Для зменшення тривалості сушіння важливо інтенсифікувати процеси зовнішнього тепло- і масообміну, для багатьох продуктів і матеріалів – інтенсифікація процесів внутрішнього переносу теплоти і маси. Для підвищення ефективності і видатності установок використовують збільшення напруги об′єму сушильної камери за вологою, сушильні агенти з високою початковою температурою, комбіновані методи енергопідведення, раціональне включення сушильних установок в енергетичну та теплову схеми підприємства тощо. Ефективність сушильних установок багато в чому залежить від вибраних методів та режимів сушіння, типу сушильної установки та її розрахунку. Проектування та розрахунок сушильних установок повинні базуватися на відомих нам основних принципах технології сушіння: в залежності від властивостей об′єктів сушіння вибирається найбільш раціональний метод і оптимальний режим сушіння і на цій основі проводять вибір або розробку сушильної установки.

6.2 Способи класифікації сушильної техніки

В промисловості застосовується велика кількість різних типів і конструкцій сушарок. У табл. 6.1 дана класифікація сучасних сушарок.

6.3 Конвективні атмосферні сушарки

В конвективних сушарках, котрі найбільше поширені в промисловості, сушильним агентом є нагріте повітря чи суміш його з димовими або топковими газами. Основні типи конвективних сушильних установок і їх умовна класифікація показані в таблиці 6.2.

Таблиця 6.1 – Класифікація сушарок

Ознака класифікації	Типи сушарок
Тиск у робочому просторі	Атмосферні і вакуумні
Режим роботи	Періодичної і неперервної дії
Сушильний агент (СА)	Повітряні, на продуктах згоряння, на суміші повітря з продуктами згоряння і на перегрітій парі
Напрямок руху СА щодо матеріалу	З прямотоком, протитоком, перехресним током і реверсивні
Характер циркуляції СА	З природною і примусовою циркуляцією
Спосіб нагрівання сушильного агента	З паровими повітропідігрівниками, вогневими повітронагрівачами–рекуператорами, шляхом змішування з продуктами згоряння, з електронагрівом
Кратність використання сушильного агента	Однократні і з рециркуляцією
Схема нагрівання сушильного агента	З централізованим підігрівом, індивідуальними агрегатами і проміжним підігрівом
Спосіб видалення вологи із сушарки	З повітрообміном, конденсаційні і з хімічним поглинанням вологи
Спосіб підведення теплоти до матеріалу	Конвективні, контактні (сушіння на гарячих поверхнях), із променистим нагріванням (терморадіаційні), з нагріванням струмами високої частоти (СВЧ), комбіновані, акустичні
Структура матеріалу, що сушиться	Твердий суцільний матеріал, кусковий, стрічковий, пилоподібний, паста чи рідкий розчин
Конструкція сушарки	Коридорна, камерна, шахтна, стрічкова, конвеєрна, барабанна, трубчаста, вібраційна тощо

Таблиця 6.2 – Основні типи конвективних сушарок

Класифікаційна ознака	Типи сушильних установок
Режим роботи (спосіб дії)	а) періодичної дії б) неперервної дії в) циклічної дії
Вид матеріалу, що висушується	а) кусковий (поштучний) б) зернистий (дисперсний) в) пилоподібний г) пастоподібний д) рідкий (розчин)
Тиск в сушильній камері	а) герметичні камери з надлишковим тиском б) атмосферні в) вакуумні герметичні камери з тиском вище потрійної точки г) середньовакуумні і глибоковакуумні (з тиском нижче потрійної точки для водяної пари)
Вид сушильного агента	а) повітряні б) газові в) газоповітряні г) парові д) рідинні

Продовження таблиці 6.2

Класифікаційна ознака	Типи сушильних установок
Спосіб створення напору для переміщення сушильного агента	а) з природною циркуляцією б) з примусовою циркуляцією
Напрямок руху матеріалу і сушильного агента	а) прямотокове б) протитокове в) перехреснотокове
Стан шару матеріалу (для зернистих матеріалів)	а) щільний б) розрихлений в) киплячий г) фонтануючий д) зважений
Спосіб нагрівання сушильного агента	а) паровими калориферами б) водяними калориферами в) вогняними калориферами г) електрокалориферами
Конструкція сушильної камери	Шафні, камерні, коридорні (тунельні), трубчасті, шнекові, вальцеві, циліндричні, турбінні, каскадні, карусельні, конвеєрні (стрічкові, ящикові, люлькові тощо) пневматичні, розпилювальні та інші
Варіант сушильного процесу	а) викидання сушильного агента назовні б) з рециркуляцією сушильного агента в) з проміжним підігрівом сушильного агента г) з додатковим підігрівом сушильного агента в сушильній камері
Спосіб видалення пари і регенерація відпрацьованого сушильного агента	а) видалення пари з відпрацьованим сушильним агентом назовні б) змішування зі свіжим агентом і підігрів (рециркуляція) в) осушення реагентами (силікагелем тощо) г) конденсація пари в конденсаторі д) виморожування парів в конденсаторі за допомогою холодоагента

6.4 Вплив умов та параметрів на процес конвективного сушіння

Режим конвективного сушіння характеризується такими параметрами:
– температурою сушильного агента t_c;
– вологістю сушильного агента – φ;
– швидкістю сушильного агента – ω.

В сушильній камері ці параметри з часом або по довжині (висоті) сушильної камери змінюються, тобто, сушіння протікає при змінному режимі. Для спрощення розгляду закономірностей конвективного сушіння їх

спочатку встановлюють для постійного режиму, а вплив режиму на процес сушіння характеризують коефіцієнтом сушіння *К,* і розрахунок процесу сушіння ведуть по зонах:

$$K = 60\frac{\ln(W_1 - W_P) - \ln(W_2 - W_P)}{\tau} \quad \left(\frac{1}{год}\right).$$

де W_1 – початкова вологість сировини;
W_2 – кінцева вологість сировини;
W_P – рівноважна вологість сировини;
τ – час сушіння.

Аналіз експериментальних результатів [3,4] показує, що найбільший вплив на швидкість сушіння має температура повітря, потім вологість і швидкість сушіння. На процес сушіння впливають також початкова вологість матеріалу і товщина шару матеріалу. З ростом початкової вологості підвищується швидкість сушіння в І – ому періоді сушіння. Після випаровування вологи з–під поверхневих шарів матеріалу швидкість сушіння для одного і того ж матеріалу різної вологості приблизно однакова (лінійна залежність). З ростом товщини шару матеріалу швидкість сушіння зменшується за степеневим законом.

7 ПРИСТРОЇ ДЛЯ СУШІННЯ КУСКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

7.1 Камерні сушарки

Основним елементом камерної конвективної сушарки (рис. 7.1) є камера, всередині якої розташовують сировину, що залишається нерухомою протягом всього процесу сушіння. Завантаження і вивантаження матеріалу проводять з однієї сторони сушарки через двері. Камерні сушарки є сушарками періодичної дії і застосовуються при малих кількостях матеріалу, який необхідно висушити. В таких сушарках сушать деревину, керамічні і силікатні вироби, різні сипучі і волокнисті матеріали, лляний і конопляний трости, сільськогосподарську продукцію: овочі, фрукти, пряну зелень, ягоди тощо.

Сировина для сушіння подається в камерні сушарки на вагонетках з піддонами, стелажах тощо і періодично перемішується вручну чи за допомогою спеціальних механізмів.

7.2 Тунельні (коридорні) вагонеткові сушарки

Тунельна вагонеткова сушарка (рис. 7.2) має подовжену камеру (тунель), всередині якої матеріал, що висушується, переміщається на вагонетках по тунелю; іноді її називають коридорною. Завантаження і вивантаження матеріалу, що висушується, відбуваються в різних кінцях камери. За режимом роботи тунельні сушарки – сушарки напівнеперервної дії. Вони застосовуються для масового сушіння матеріалів (деревини, керамічних виробів, різних сипучих і волокнистих матеріалів, фруктової кісточкової сировини), що насипаються на піддони, розташовані на рухомих вагонетках.

Довжина камер тунельних (чи коридорних) вагонеткових сушарок може досягати 60 *м*, а ширина до 6 *м*. При проектуванні цих сушарок і під час їхньої експлуатації прагнуть до того, щоб зазор між вагонеткою, стіною і стелею не перевищував 70 – 80 *мм*, а відстань між вагонетками 75 *мм*.

Довжина сушильної камери визначається за формулою:

$$L = \frac{П}{V_П} l_B \frac{\tau}{24} + l = n l_B + l \ , м, \qquad (7.1)$$

де $П$ – годинна чи добова видатність сушарки, *м*^{3}*/год*, чи *м*^{3}*/до*бу;

$V_п$ – корисна ємність сушильного штабеля чи вагонетки, *м*^{3};

$l_в$ – габаритна довжина штабеля чи вагонетки з матеріалом, що вивантажується через певні проміжки часу;

τ – тривалість сушіння (визначається за тепловим та технологічним розрахунками чи вибирається за нормативними даними), *год*;

l – додаткова довжина, необхідна для розбігу вагонеток, вона може також включати зону попереднього нагрівання чи остигання, *м*;

n – число штабелів чи вагонеток у сушильній камері;

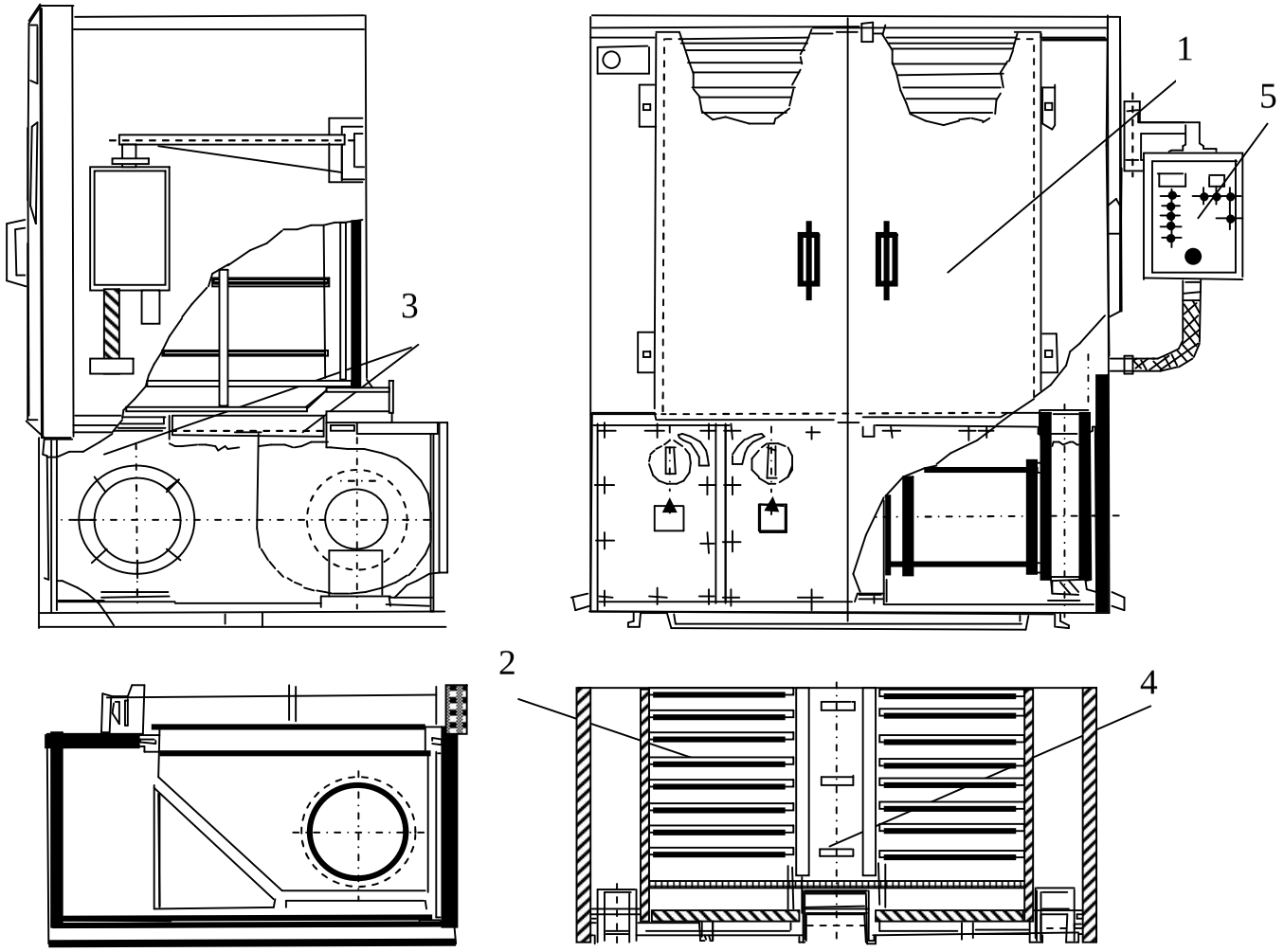
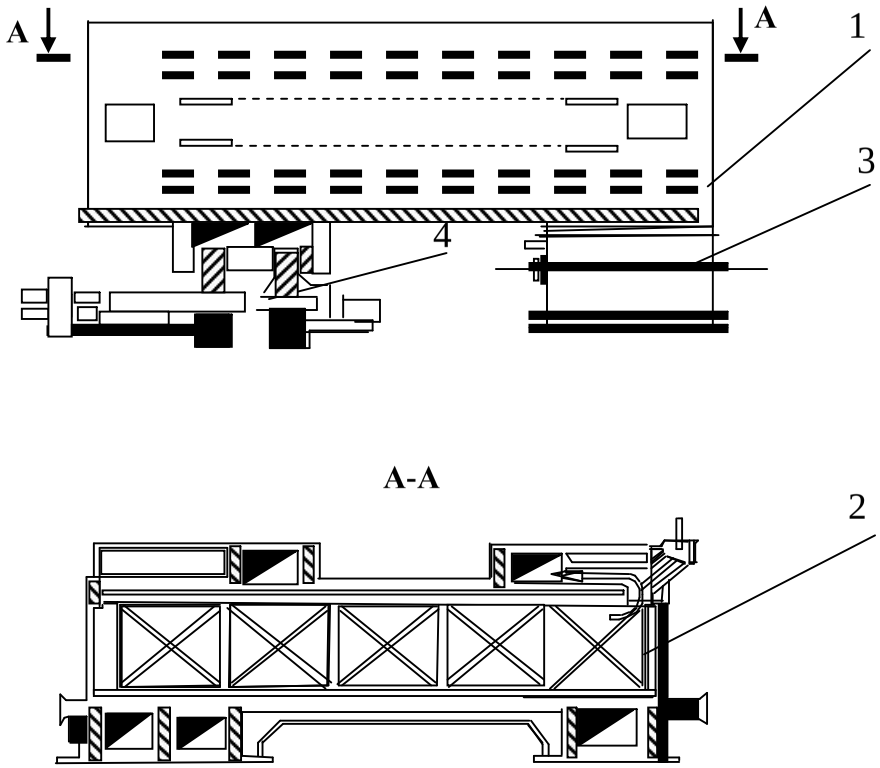


Рисунок 7.1 – Камерна сушарка «Садочок – 250»
1 – камера, 2 – стелажі, 3 – вентилятори, 4 – теплогенератор, 5 – пульт керування



Технічні характеристики

1 Видатність
за сировиною 150 кг/год;
за готовим продуктом 50 кг/год.
2 Кількість стелажів 18 шт.
3 Довжина сушильного каналу 11м.
4 Кількість тунелів 2.
5 Витрати енергії на 1 кг готової продукції 1,397 кВт/кг.
6 Габаритні розміри сушарки 11×35×3,85 м.

Рисунок 7.2 – Конвеєрна тунельна сушарка
1 – корпус; 2 – вагонетки; 3 – система приводу вагонеток, 4 – дуттьові пристрої

Ємність сушильної камери:

$$V_K = П\tau / 24 \text{ , } м^3. \quad (7.2)$$

Коефіцієнт корисного використання об′єму камери

$$\eta = V_Г n / V_K . \quad (7.3)$$

Циркуляція сушильного агента здійснюється як за рахунок вільної, так і вимушеної конвекції (за допомогою вентилятора). Практика експлуатації показала, що для масового сушіння матеріалів нераціонально застосовувати сушарки з природною циркуляцією сушильного агента, тому що сушіння матеріалів відбувається в них довше і готовий продукт отримують гіршої якості; питома витрата теплоти на сушіння в них більша, ніж у сушарках із примусовою циркуляцією.

Тунельні сушарки можуть мати різні варіанти сушильних процесів, тобто працювати з однократним використанням сушильного агента, рециркуляцією, проміжним підігрівом і позонною циркуляцією.

Найбільшого поширення набули сушарки з рециркуляцією сушильного агента. Реверсивність, яку здійснюють шляхом періодичної зміни напрямку обертання осьових вентиляторів у зонах, забезпечує рівномірне сушіння матеріалу з обох сторін штабеля. Сушарки з внутрішніми, як правило, осьовими вентиляторами мають меншу витрату електроенергії, ніж із зовнішніми, відцентровими, але менш зручні в експлуатації.

Особливістю топок для лісосушарок є наявність в них спеціальних камер і циклонів для очищення топкових газів, які потім змішуються з сушильним агентом, що рециркулює в сушарці. Крім того, у цих топках здійснюється напівгенераторний процес спалювання твердого палива і допалювання газу подачею вторинного повітря. Для одержання чистих топкових газів через шар палива проходить невелика кількість повітря *(α<1).*

7.3 Стрічкові сушарки

Стрічкові сушарки працюють за принципом неперервної дії і застосовуються для сушіння бавовни, вовни, пряжі й інших матеріалів волокнистої структури, фруктів і овочів, нарізаних на шматочки різної конфігурації, а також чаю, сірників, лляної соломи тощо. Сушарка має камеру, всередині якої матеріал, що висушується, переміщується разом з несучою його стрічкою. Сушку виконують підігрітим повітрям чи сумішшю його з топковими газами при температурі суміші 70 – 170°С.

Циркуляція повітря здійснюється осьовими вентиляторами. Повітря пронизує сировину зверху вниз і притискає її до стрічкового транспортера. Висушений матеріал сходить зі стрічки на відвідний транспортер. Такі сушарки будуються із шириною стрічки до 2–2,2*м* і довжиною 30–40*м*. Недоліком їх є нерівномірність сушіння по товщині шару. Кращі результати за рівномірністю сушіння мають багатоярусні стрічкові сушарки, у яких матеріал перемішується при пересипанні з однієї стрічки на іншу.

Довжину робочої стрічки в стрічковій сушарці можна визначити за формулою (7.1), якщо замість V_n підставити об′єм матеріалу, розташовуваний на 1 м стрічки (у цьому випадку *l=1*), а для конвеєрної сушарки замість V_n підставляють кількість виробів, розташовуваних на 1 погонному метрі конвеєра. В цих сушарках витрата теплоти складає від 5000 до 7500*кДж/кг* вологи.

7.4 Конвеєрні сушарки

Конвеєрні сушарки бувають тільки неперервної дії і застосовуються для сушіння металевих виробів після фарбування, клеєних виробів зі шпону і фанери, у ливарних цехах — для сушіння опок і стержнів, сушіння рослинної с/г сировини. Вони мають камери, всередині яких матеріал, що висушується, пересувається на несучому конвеєрі.

Конвеєрна сушарка для сушіння пофарбованих автодеталей показана на рис. 7.3. У цій сушарці повітря і деталі, що висушуються, рухаються протитоком. Для сушіння деяких фарб і лаків допускається висока температура; в цьому випадку повітря може підігріватися в рекуператорі топковими газами зі спеціальної топки. Застосування безкалориферного підігріву повітря (змішуванням з газами чи в регенераторах) у даному випадку неприпустиме, тому що сушильний агент повинен бути зовсім чистим.

Сушарки для сушіння фарб, розчинених в уайт–спіриті, працюють з однократним використанням гарячого повітря, тому що підвищення концентрації в повітрі уайт–спіриту при рециркуляції неприпустиме через небезпеку вибухів.

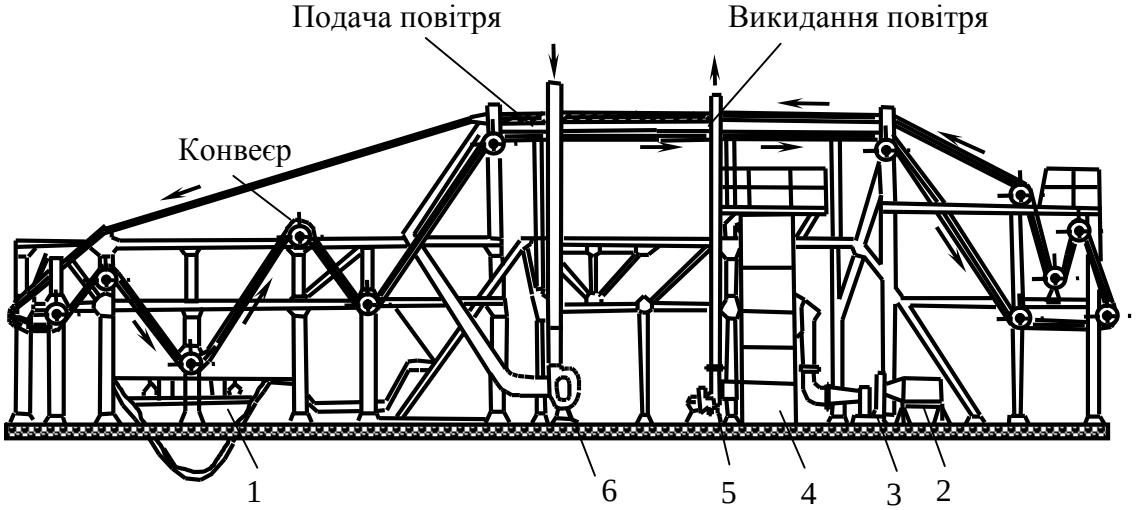


Рисунок 7.3 - Конвеєрна сушарка з підігрівом повітря в газовому рекуператорі для сушіння пофарбованих автодеталей.
1 – ванна для фарбування деталей; 2– фільтр для очищення свіжого повітря; 3 – вентилятор для подачі свіжого повітря; 4 – рекуператор; 5 – топка; 6 – вентилятор для видалення відпрацьованого повітря

8 СУШІННЯ СИПУЧИХ, ПОДРІБНЕНИХ АБО ДИСПЕРГОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

8.1 Шахтні сушарки

У вертикальній шахті під дією сили тяжіння сипучий матеріал, що висушується, падає і пронизується сушильним агентом, котрий рухається назустріч йому. Сушарки можуть розрізнятися за характером руху матеріалу всередині шахти. Можливі такі варіанти:

- матеріал рухається всередині шахти зі швидкістю вільного падіння;
- вільне падіння матеріалу штучно сповільнюється шляхом установлення полиць різної форми;
- матеріал рухається в шахті суцільною масою і швидкість його руху визначається періодичним чи неперервним відбором висушеного матеріалу в нижній частині шахти; шахта завжди заповнена матеріалом, що сушиться;
- швидкість руху матеріалу в шахті визначається швидкістю транспортних механізмів, розташованих всередині шахти.

Сушарки перших двох груп застосовуються для матеріалів, в яких необхідно видалити тільки поверхневу вологу, наприклад солі, руди і т.п. Період сушіння для сушарок з вільним падінням визначається декількома секундами, а для шахт з уповільненим рухом – хвилинами чи навіть декількома годинами. Шахтні сушарки раціонально застосовувати для матеріалів, що за технологією виробничого процесу необхідно піднімати на значну висоту (10–20 м).

Шахтні сушарки дуже громіздкі і в наш час витісняються іншими типами сушарок. Схема шахтної сушарки для сушіння зерна подана на рис. 7.4

8.2 Барабанні сушарки

Барабанні сушарки (рис. 8.1) застосовуються для сушіння вугілля, піску, глини, вапняку, цукру та інших сипучих матеріалів. Основним елементом їх є горизонтальний чи ледве нахилений обертовий циліндричний барабан, що обертається зі швидкістю 2 – 6 *об/хв*, всередині якого переміщується по довжині, перемішується й одночасно сушиться сипучий матеріал. Нахил барабана щодо горизонтальної осі передбачений для поступового пересування матеріалу від одного кінця до іншого і складає звичайно до 6°. Всередині барабана в залежності від матеріалу, котрий необхідно висушити, встановлюють різні насадки чи поздовжні лопати–мішалки, що сприяють інтенсифікації процесу сушіння.

Основною характеристикою барабанних сушарок є напруга об′єму барабана за вологою: $A = W/V_\tau$ – кількість вологи, що випаровується з 1 $м^3$ об′єму барабана за годину.

Величина A залежить від типу, коефіцієнта заповнення і числа оборотів барабана, теплофізичних властивостей і розмірів частинок матеріалу,

а також від температури, вологості і швидкості сушильного агента всередині барабана і складає від 50 до 150 *кг/(м^3·год)*. Витрата теплоти q = 3340 – 5000 *кДж/ кг вологи*, а витрата електроенергії на обертання і вентиляцію барабана знаходиться в межах від 0,005 до 0,007 *кВт·год* на 1 *кг* випарованої вологи.

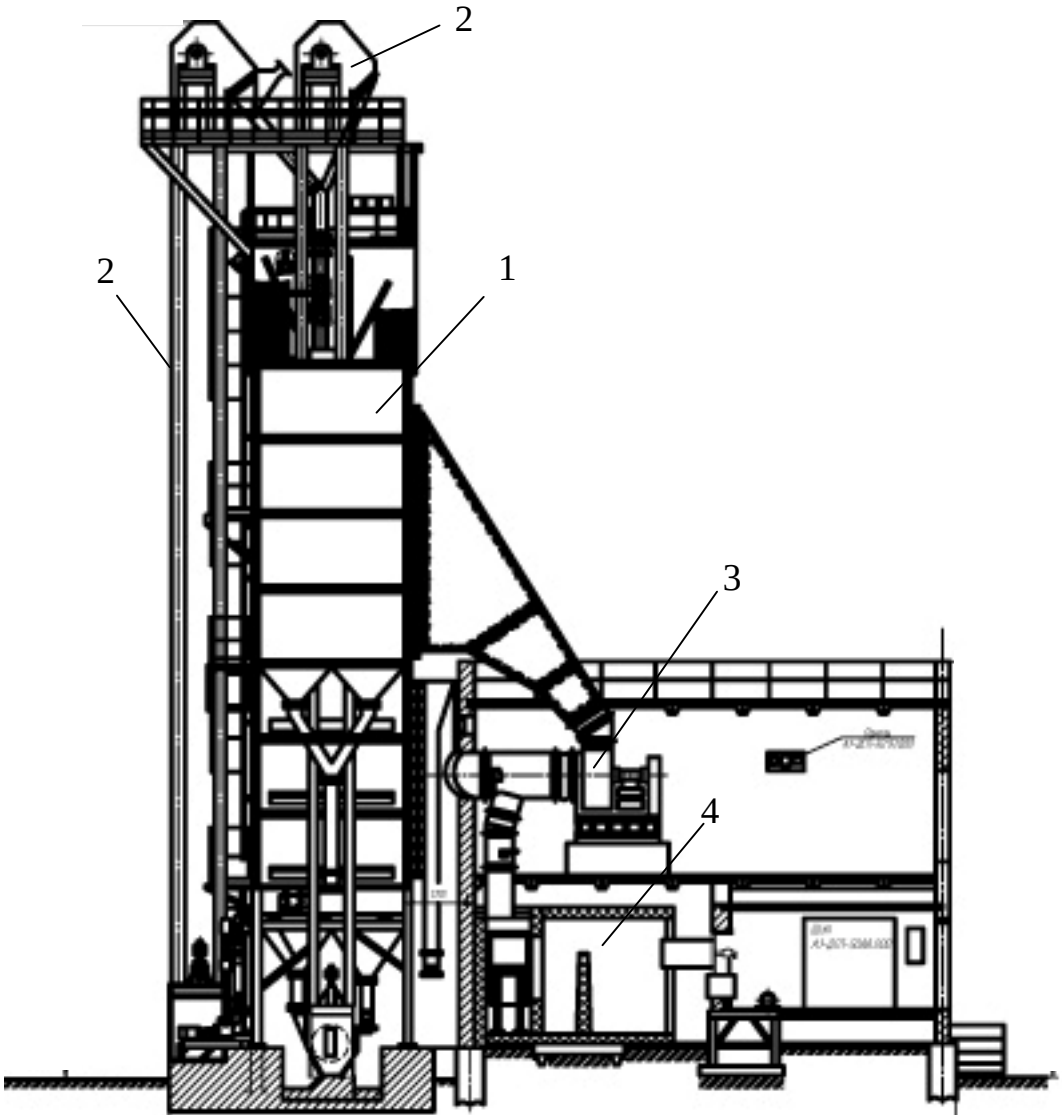


Рисунок 7.4 – Шахтна сушарка М819 для сушіння зерна
1 – шахта; 2 – норії для подачі зерна; 3 – дуттьові вентилятори; 4 – топка;

8.3 Пневматичні сушарки

Пневматичні сушарки (рис.8.2) як основний агрегат мають вертикальну камеру чи трубу, у якій подрібнений матеріал при висушуванні знаходиться в зваженому стані. Для підтримки частинок у зваженому стані швидкість сушильного агента (повітря чи димових газів) повинна бути більшою від швидкості літання частинок; у залежності від розміру частинок вона підтримується від 10 до 40 *м/с*.

За режимом роботи пневматичні сушарки – сушарки неперервної дії. Вони застосовуються для сушіння дробленого вугілля, фрезерного торфу, різаної трави, дрібнокускових і кристалічних матеріалів. Час перебування частинок у трубі звичайно не перевищує 1–2 *с*, тому вдається випарувати тільки вільну вологу і знизити вологість матеріалу лише на 4–8%. Витрата теплоти в цих сушарках складає q = 4180– 6670 *кДж/ кг вологи*. У 1 $м^3$ об′єму труби випаровується за 1 годину від 150 до 450 *кг* вологи. На рис.8.2 показана пневматична труба–сушарка з частковим підмішуванням висушеного матеріалу для одержання сипкості вологого матеріалу.

Коефіцієнт теплообміну між газом і частинками з високим ступенем точності визначається з рівняння:

$$Nu = \alpha d_e / \lambda = 0,4 Fe^{0,9} \qquad (8.1)$$

де: критерій Федорова визначається за формулою: $Fe = \sqrt[3]{Re^2_{вит}\,\xi}$, в якій Re – критерій Рейнольда для швидкості, рівної швидкості витання частинок в трубі,

ξ – коефіцієнт лобового опору частинок в потоці;

d_e – еквівалентний діаметр частинок, оскільки у пневматичних сушильних установках звичайно приходиться переміщати частинки неправильної форми: $d_e = 10\sqrt[3]{\dfrac{6G}{\pi n \rho}}$,

λ – теплопровідність середовища,

G – середня маса частинок,

n – кількість частинок в пробі,

ρ – густина частинок, *кг/м*^{3}.

Швидкість газу в трубі–сушарці вибирається більшою від швидкості витання з умови переміщення частинок більшого діаметра:

$$w_r = (1,5 - 1.25) w_{вит} \qquad (8.2)$$

Для визначення $w_{вит}$ користуються залежностями $L_y = f(Re_{вит})$ для частинок неправильної форми. Довжина труби $l = \tau(w_г - w_{вит})$. Додаткова довжина розгінної ділянки:

$$l_{дод} = 0,5 w_г\, d_e \qquad (8.3)$$

Загальна довжина труби–сушарки :

$$L = l + l_{дод} \qquad (8.4)$$

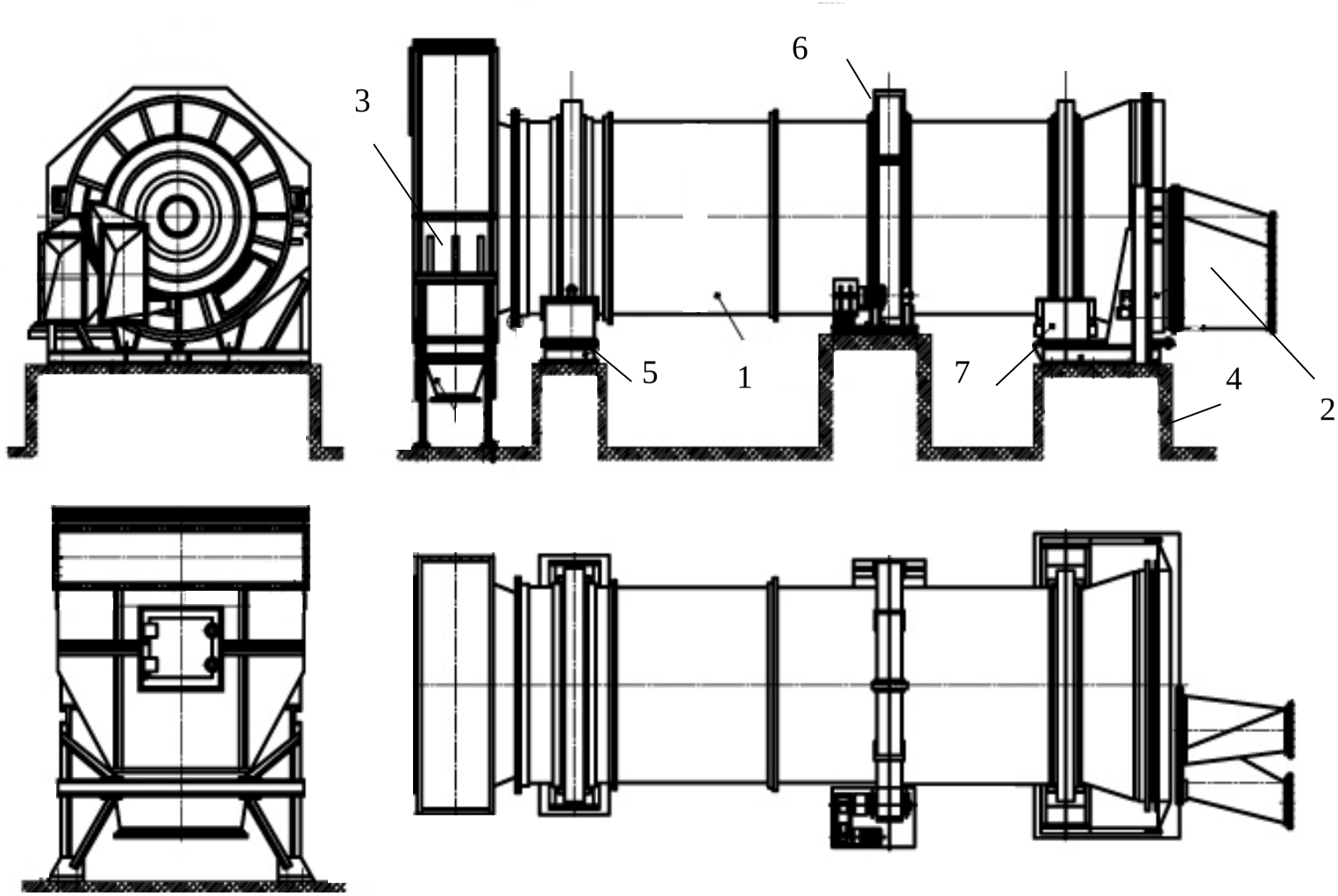


Рисунок 8.1 – Барабанна сушарка для сушіння цукру
1 - ,барабан; 2 – отвір для вивантаження, 3 – завантажувальний отвір;
4 – основа; 5,7 – опорні колеса; 6 – привідне колесо

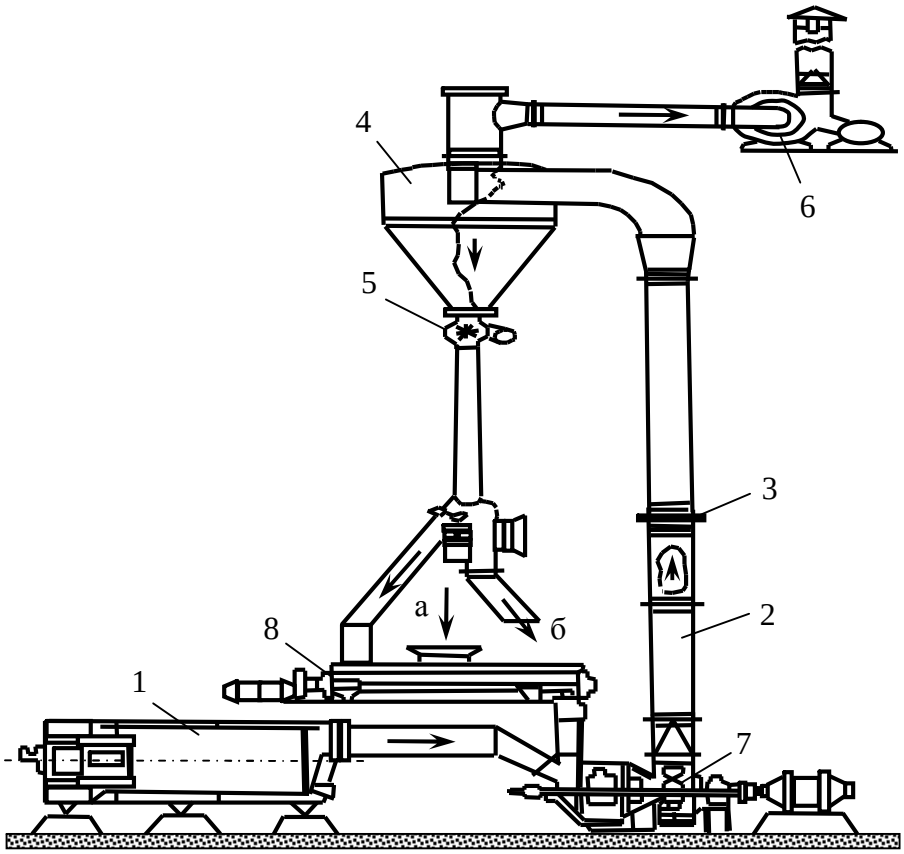


Рисунок 8.2 - Пневмосушарка
1 – топка; 2 – вертикальна труба–сушарка; 3 – компенсатор температурних подовжень; 4 – циклон; 5 – шлюзовий затвор; 6 – димосос;
7 – вентилятор або ударний млин; 8 - шнековий змішувач

Діаметр труби–сушарки:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0{,}785 w_r}} \tag{8.5}$$

де V — об′єм газу, що переміщується в трубі–сушарці, $м^3/с$.

Час сушіння, $с$:

$$\tau = \frac{Q \cdot 3600}{\alpha F \Delta t}, \tag{8.6}$$

де Q — витрата теплоти на нагрівання частинок і на випаровування вологи, *кДж/год*;

Δt— середній температурний напір між газом і частинками матеріалу, що сушиться, °С;

F — поверхня частинок, що проходять через сушарку протягом години, розрахована за формулою:

$$F = \pi \cdot n' \cdot d_e^2 = \frac{6G}{d_e \rho}, \quad м^2/год \tag{8.7}$$

8.4 Сушарки з псевдокиплячим шаром

Вони застосовуються для сушіння різних дрібнозернистих матеріалів. Сушарки виготовляються у вигляді циліндричної чи прямокутної камери, всередині якої на одній чи декількох східчастих решітках знаходиться в псевдокиплячому стані матеріал, що висушується. На рис.8.3 показана схема сушарки з киплячим шаром. Для підтримки рівномірного «кипіння» частинок у шарі сушильний агент (повітря чи топкові гази) подається під решітки рівномірно і з відповідною швидкістю розподіляється по всій їх площі. Подача вологого матеріалу на решітки відбувається у верхній частині сушильної камери, а відбір висушеного матеріалу здійснюється на рівні шару матеріалу в нижній частині камери.

Перевагами сушіння матеріалів у псевдокиплячому шарі є висока інтенсивність сушіння, майже однакова за всім об′ємом температура псевдокиплячого шару, і можливість регулювання часу перебування матеріалу в сушарці (у межах від декількох хвилин до десятків хвилин);

Недоліками є значна витрата електроенергії для створення тиску газу під решітками 2,94 – 4,9 *кПа* (300 ÷ 500 *мм. вод. ст.*), що забезпечує кипіння шару, а також здрібнювання частинок матеріалу в псевдокиплячому шарі.

В наш час сушарки з псевдокиплячим шаром витісняють барабанні сушарки і труби–сушарки.

Розрахунок сушарок з псевдокиплячим шаром відрізняється тим, що після визначення кількості випаруваної вологи, питомої витрати газів і теплоти обчислюється значення критерію Архімеда за формулою: $Re^3=Ar\cdot Ly$, де як визначальний розмір підставляється середній еквівалентний діаметр частинок, а за визначальну температуру приймається температура відпрацьованих газів. Потім, користуючись графіком рис. 8.5, знаходять критичне значення критерію Лященко $Ly_{кр}$ (для $\varepsilon = 0{,}4$) і визначають критичну швидкість псевдозрідження.

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{Ly_{кр}\nu g \rho_м}{\rho_г}} \tag{8.8}$$

де $\rho_м$, $\rho_г$ густини частинок і газу, *кг/м*^{3};

ν — кінематична в'язкість газу, *м*^{2}*/с*.

За рис. 8.4 визначають також значення критерію Ly для найбільшої можливої пористості киплячого шару і знаходять число псевдорозрідження:

$$k_\nu = \sqrt[3]{Ly/Ly_{кр}} \tag{8.9}$$

Швидкість газу (розрахована на повний переріз решітки $s_{реш}$)

$$w = k_\nu w_{кр} \tag{8.10}$$

Швидкість газу в отворах решітки

$$w_{отв} = w\frac{273 - t_1}{273 + t_2} f_ц \tag{8.11}$$

де t_1 і t_2 – температура газу на вході і на виході із сушарки, °*C*;

f_n – прохідний переріз решітки (приймається від 0,05 до 0,1 величини $s_{реш}$).

Повна площа решітки

$$s_{реш} = \frac{L}{\rho_г w} \tag{8.12}$$

де: *L* — секундна витрата газу, кг/с. Діаметр решітки

$$D_{реш} = \sqrt{s_{реш}/0{,}785} \tag{8.13}$$

Далі розраховують сепараційний простір, висота якого приймається в 4 рази більшої висоти киплячого шару $H_{кш}$, мм, тобто:

$$H_{сеп} = 4H_{кш}$$

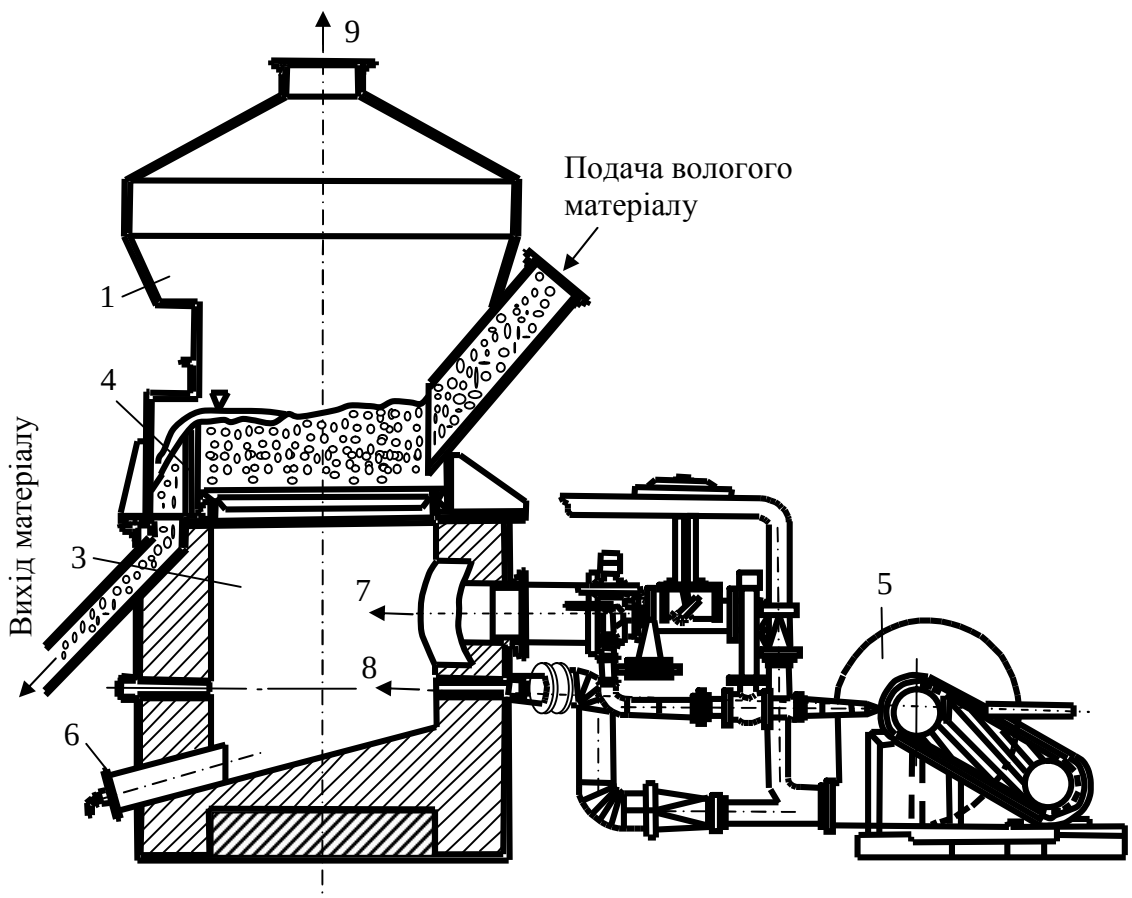


Рисунок 8.3 - Одноступінчаста сушарка з киплячим шаром.
1 – робоча камера сушарки; 2 – підрешітковий простір; 3 – решітка; 4 – електровентилятор; 5 – люк для чищення; 6 – гідравлічний поріг; 7 – подача продуктів згоряння (сушильного агента); 8 – подача повітря для регулювання температури;
9 – відведення відпрацьованих газів до циклона

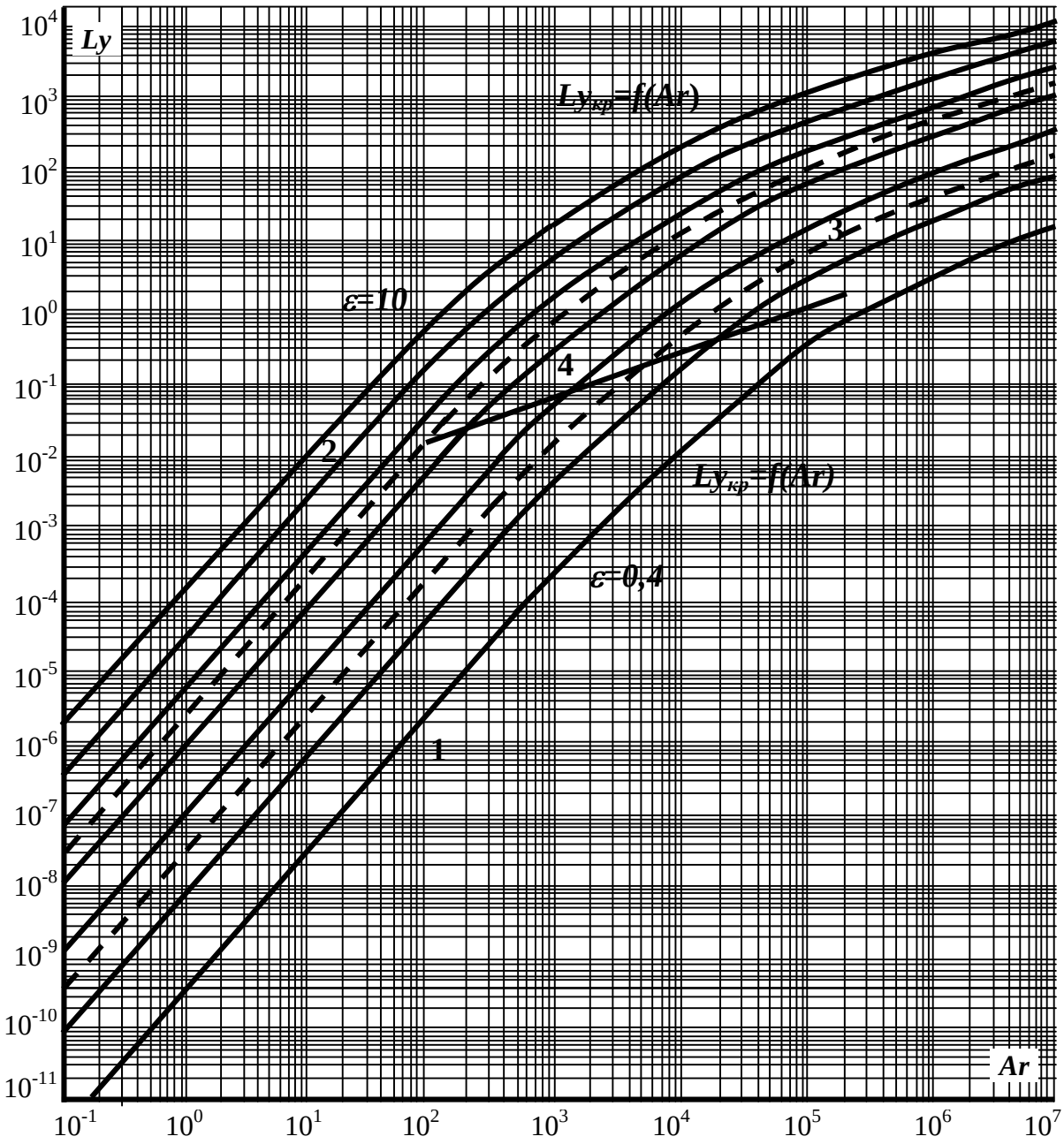


Рисунок 8.4 – Залежність критерію Лященко *Ly* від критерію Архімеда *Аг* для різної пористості шару *ε*.
1 – для *ε=0,4* (початок псевдорозрідження); 2 – *ε=1* (для швидкості витання); область між лініями 3–4 – орієнтовна область роботи сушарок киплячого шару

Висота киплячого шару приймається також у 4 рази більшою від висоти гідродинамічної стабілізації чи висоти зони дії струменів:

$$H_{кш} = 4h_{ст}$$

Загальна висота апарата над решіткою

$$H = H_{сеп} + H_{кш}$$

Між висотою гідродинамічної стабілізації $h_{ст}$ і діаметром отворів у

решітках $d_{отв}$ існує така емпірична залежність:

$$\frac{h_{ст}}{h_{отв}} = 20 \tag{8.14}$$

Кількість матеріалу, який може одночасно знаходитися в киплячому шарі сушильної камери:

$$G = \frac{Q\rho_м d_е}{6\alpha\Delta t_л} \tag{8.15}$$

де: $\rho_м$ – густина частинок, *кг/м*^{3};
$d_е$ – середній еквівалентний діаметр частинок, *м*;
$\Delta t_л$ – середня логарифмічна різниця температур між газом і матеріалом в активній зоні сушарки, °С;
$Q = Q_{наг}+Q_{вип}$ – кількість теплоти, що передається від сушильного агента до матеріалу, який знаходиться в киплячому шарі, *кДж/с*;
α – коефіцієнт тепловіддачі, який приймається за дослідними даними чи обчислюється за емпіричними залежностями, наприклад:

$$Nu = \frac{\alpha d_е}{\lambda} = 0{,}01\,Re^{0{,}8}\,Fe^{0{,}53}\,(H_0/d_е)^{-0{,}45} \tag{8.16}$$

У цій формулі H_0 – висота нерухомого шару, *м*.

8.5 Сушарки з віброкиплячим шаром

В наш час розроблені сушарки з віброкиплячим шаром, у яких встановлюються решітки, що вібрують з певною частотою. Завдяки цій вібрації киплячий шар виникає для швидкостей фільтруючого газу, у 1,5 – 2 рази менших швидкостей відповідних псевдозрідненню. Вибір цього типу сушарок визначається техніко–економічним розрахунком і технологічними особливостями матеріалу, який необхідно висушити.

8.6 Сушарки, що працюють за принципом розпилювання

Розпилювальні сушарки неперервної дії застосовуються для сушіння молока, яєць і різних рідких розчинів. Вони містять камеру, всередині якої сушіння матеріалу відбувається в розпиленому стані. Розпилювання досягається за допомогою механічних і пневматичних форсунок чи диска, котрий швидко обертається всередині камери, на який тонкою цівкою подається розчин з живильної трубки. На рис. 8.6 показана сушарка з розпилюванням матеріалу за допомогою диска.

Спрощений розрахунок цих сушарок ведуть за довідковими даними теплової напруги об′єму сушарки за вологою. Розпилювальна сушарка для сушіння молока показана на рис. 8.5.

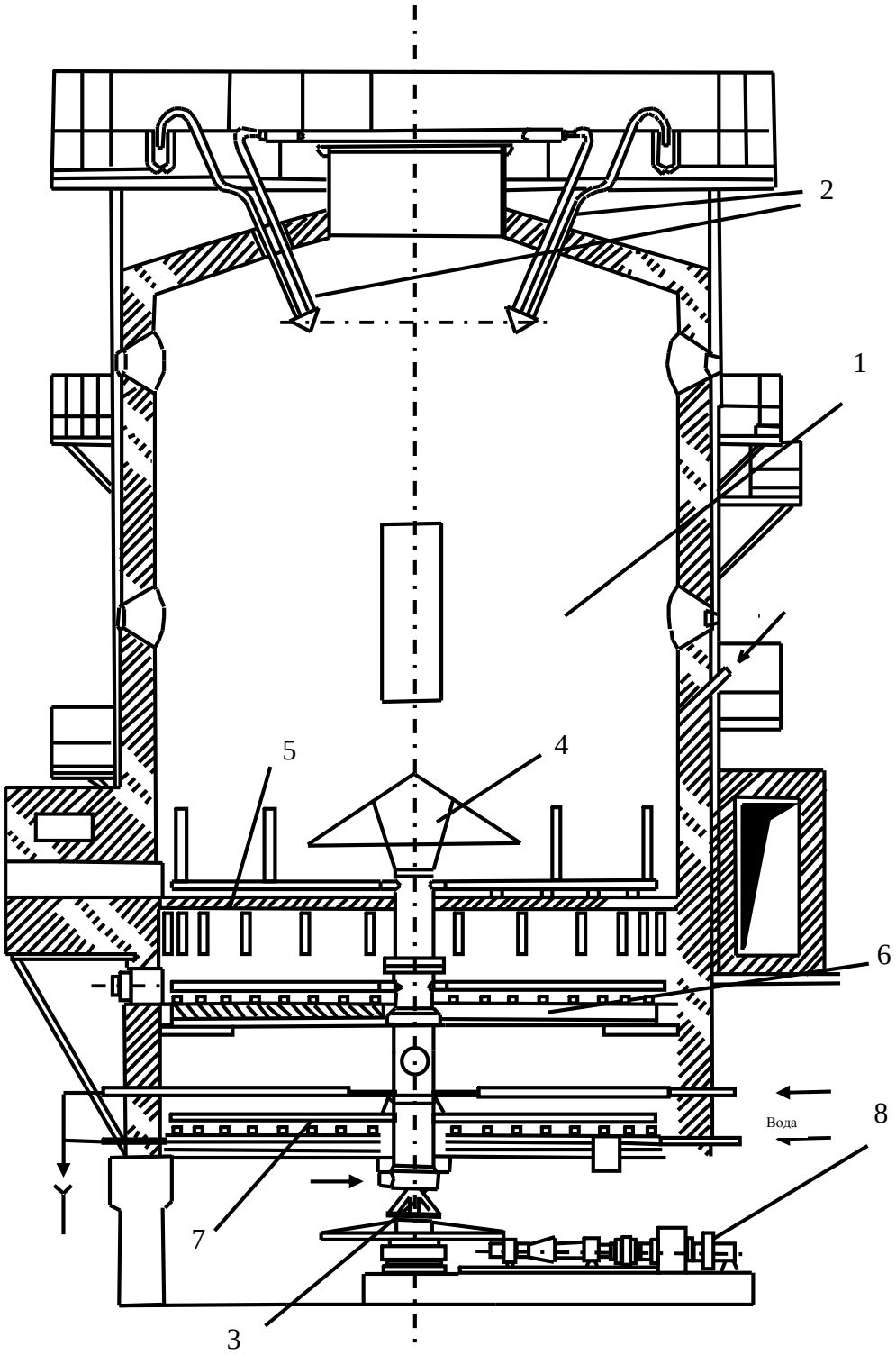


Рисунок 8.5 – Сушарка з розпилювальним диском.
1 – сушильна камера; 2 – сопла; 3 – електродвигун з редуктором;
4 – розпилювальний диск; 5 – скребки; 6 – розвантажувальний шнек;
7 – рукавні фільтри; 8 – привід до скребків і шнека

8.7 Терморадіаційні сушарки

В останні роки як у нашій країні, так і за кордоном у різних галузях промисловості набув широкого застосування новий спосіб сушіння матеріалів – інфрачервоними променями (променистою тепловою енергією). Цей спосіб застосовується для поверхневого сушіння лакофарбових покрить, металевих і дерев'яних виробів, тонких паперових, текстильних матеріалів і подрібнених харчових продуктів, а також для сушіння в тонкому шарі сипучих матеріалів, коли потрібно видалити тільки поверхневу вологу (чи перемістити її всередину виробу (наприклад, для сушіння ливарних форм).

Для сушіння інфрачервоними променями інтенсивність випаровування вологи в порівнянні з конвективним чи контактним сушінням може збільшуватися в десятки разів. Це пояснюється тим, що кількість теплоти, яку можна передати матеріалу в радіаційному сушінні, є значно вищою, ніж для конвективного. Наприклад, у перший період конвективного сушіння при температурі повітря *100°С*, його вологості $\varphi = 5\%$, швидкості *2 м/с* і температурі матеріалу, що відповідає температурі мокрого термометра $\vartheta_м = t_м = 40$ °С, тепловий потік $q = 874$ *Вт/м*^{2}, а при сушінні термовипромінюванням для температури випромінювальної поверхні *600 °С* і температури матеріалу *40 °С* тепловий потік $q = 26\,200$ *Вт/м*^{2}, тобто більше приблизно в *30* разів. Якщо температуру генераторів випромінювання збільшити до *800 °С*, то потужність теплового потоку може стати в *70* разів більшою, ніж для конвективного сушіння.

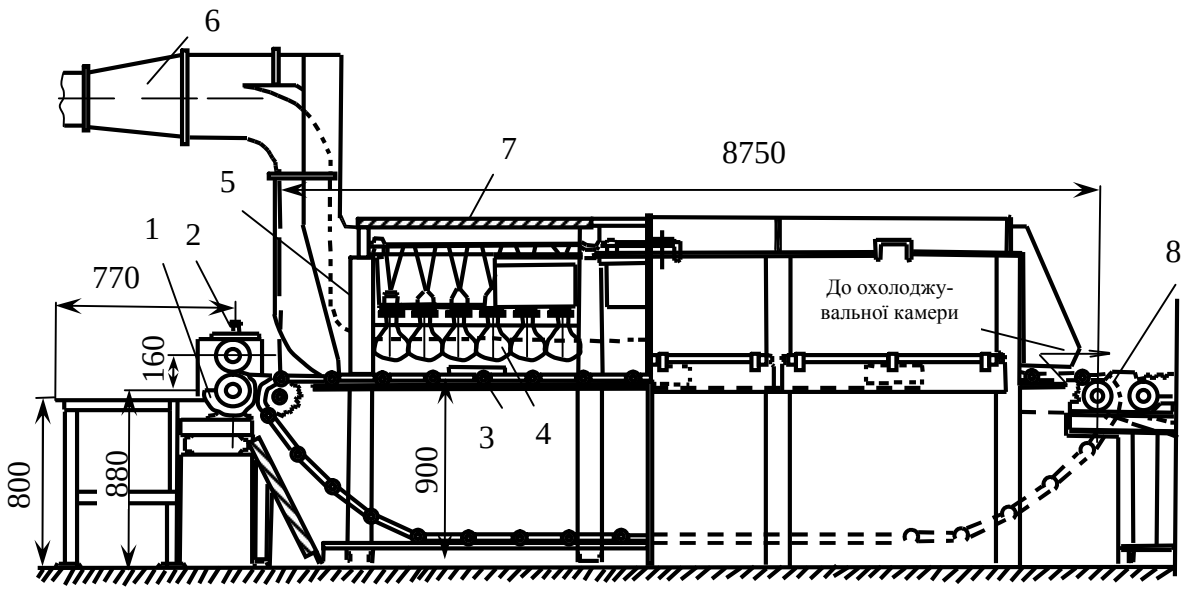


Рисунок 8.6 – Лампова терморадіаційна сушарка для сушіння лакованих електротехнічних деталей
1– лакувальна ванна; 2 – наносні лакувальні валики; 3 – стрічковий транспортер; 4 – дзеркальні лампи; 5 – каркас сушарки; 6 – витяжний повітряпровід; 7 – теплоізоляційні листи; 8 – приводна зірочка

Але, як показують досліди, не завжди можна збільшити швидкість сушіння пропорційно збільшенню теплового потоку, тому що вона визначається не швидкістю передачі теплоти, а швидкістю переміщення вологи всередині матеріалу і необхідною якістю готового продукту.

Терморадіаційні сушарки бувають як стаціонарними, так і переносними.

Переносні терморадіаційні сушарки застосовуються для сушіння об'єкта на місці, наприклад: вологих обмоток електродвигунів, пофарбованих після ремонту суден, літаків, автомобілів, стін приміщень тощо. Як випромінювач інфрачервоних променів у переносних сушарках звичайно застосовуються спеціальні електролампи.

За видом генераторів інфрачервоного випромінювання терморадіаційні сушарки можна розділити на лампові, сушарки з кварцовими і трубчастими чи спіральними електронагрівниками і сушарки з металевими і керамічними випромінювачами для газового обігріву. У більшості випадків терморадіаційні сушарки з газовим обігрівом більш економічні, ніж терморадіаційні, що працюють з використанням електроенергії.

На рис. 8.6 показана лампова сушарка, а на рис. 8.7 показано загальний вигляд радіаційно–конвективної сушарки для конвеєрного сушіння лакофарбових покрить на Мінському автозаводі. У радіаційній зоні відбувається швидке нагрівання виробу до *140–150°С*, при якому з плівки випаровується до 90% розчинника. У конвективній зоні відбувається: вирівнювання температур по поверхні виробу і полімеризація покриття. Загальна тривалість процесу складає *10* хвилин.

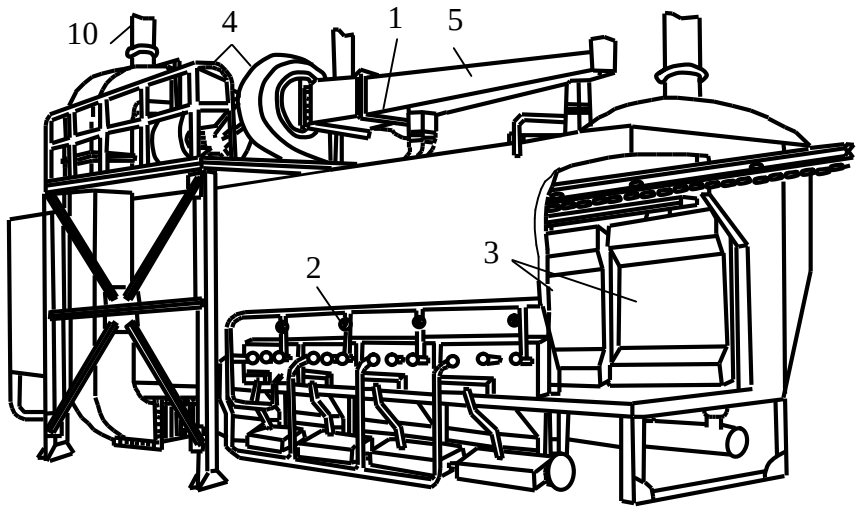


Рисунок 8.7 – Терморадіаційно–конвективна сушарка для лакофарбових покрить
1 – сушильна камера; 2 – газопровід; 3 – терморадіаційна панель; 4 – вентилятор; 5 – лінія подачі відкидного повітря для горіння; 6 – лінія забору димових газів з панелей; 7 – лінія забору сушильного агента з конвективної зони; 8 – лінія повернення газів на рециркуляцію; 9 – повітряна завіса в дверях; 10 – викиди в атмосферу

Спалювання газу відбувається в щілинних пальниках, встановлених у нижній топковій зоні радіаційних панелей; продукти згоряння змішують-

ся з газами, що циркулюють у конвективній зоні.

Головною задачею теплового і конструктивного розрахунку терморадіаційних сушарок є визначення кількості і розмірів генераторів променистої енергії (електроламп, ТЕНів, випромінювальних панелей і т.п.), тому що інтенсивність термообробки чи сушіння матеріалів визначається щільністю променистих потоків.

Повітря чи його суміш з топковими газами в цих сушарках не є сушильним агентом (їхня роль зводиться до вентиляції сушильної камери від шкідливих виділень), тому застосування для розрахунку цих сушарок h–d–діаграми вологого повітря неможливе.

Рівняння теплового балансу для умов электролампового сушіння лакофарбових покрить (рис. 8.6) можна представити рівнянням, у якому енергія, яка поглинається тілом, що опромінюється, за час dτ, буде витрачатися на його нагрівання, на втрати теплоти у навколишній простір конвекцією і випромінюванням, і на випаровування з нього вологи:

$$AEs_0 d\tau = Gcdt + \alpha_k (t - t_n) sd\tau + 5{,}67\varepsilon_{np}[(T/100)^4 - (T_0/100)^4]sd\tau + q_m re^{-\chi l} d\tau \quad (8.17)$$

де A — коефіцієнт поглинання випромінювання опромінювальним тілом;
E – густина опромінення – густина променистого потоку по поверхні, що опромінюється, *Вт/м*^{2};
s_o і s – площа поверхні, що опромінюється і повної поверхонь тіла, *м*^{2};
τ– час від початку опромінення, *с;*
G – маса тіла, що опромінюється, *кг;*
c – теплоємність тіла, що опромінюється, *кДж/(кг·К);*
t і t_n – температури тіла і навколишнього повітря, *°С*;
$\alpha_к$ – коефіцієнт теплообміну конвекцією, *Вт/(м*^{2}*·К)*;
$\varepsilon_{пр}$ – приведена ступінь чорноти тіла, що опромінюється, і внутрішніх огороджень сушарки;
T і T_0 – температури тіла і навколишніх поверхонь, *К*;
q_m – початкова інтенсивність чи швидкість випаровування речовини, *кг/(м*^{2}*·с)*;
χ – показник поглинання випромінювання тілом, *1/м*;
l – глибина проникності речовини променистим потоком від його зовнішньої поверхні, *м*.

Дане рівняння дійсне і для розрахунку інших типів терморадіаційних сушарок, якщо в праву частину рівняння підставити відповідну кількість теплоти, передану від даного випромінювача, з врахуванням зворотного відбиття променистого потоку.

9 КОНТАКТНІ АТМОСФЕРНІ І ВАКУУМНІ СУШАРКИ

В контактних сушарках сушіння здійснюється за рахунок теплоти, отриманої матеріалом в результаті контакту з нагрітою плоскою чи циліндричною твердою поверхнею. У більшості випадків нагрів поверхні проводиться водяною парою, а в деяких випадках – гарячою водою, гарячою олією чи високотемпературними теплоносіями.

9.1 Вальцьові сушарки

Вальцьові сушарки (рис. 9.1) є сушарками неперервної дії і призначаються для сушіння текучих речовин (розчинів, колоїдів і суспензій). Як основний вузол вони мають один чи два порожніх обертових вальці, що обігріваються зсередини парою чи якимось іншим теплоносієм. На поверхні вальців за період менше ніж один оберт проходить висушування нанесеного тонким шаром рідкого чи пастоподібного матеріалу. Висушений матеріал зскрібається з вальця шкребком чи спеціальними ножами.

9.2 Циліндричні сушарки

Циліндричні сушарки працюють за принципом неперервної дії і застосовуються для сушіння стрічкових матеріалів (тканин, паперу, целюлози тощо). Основними елементами сушарки є кілька обертових порожніх циліндрів, що обігріваються зсередини парою, на гарячій поверхні цих циліндрів відбувається висушування стрічкового матеріалу.

Сушарки виготовляються з вертикальним і горизонтальним розташуванням циліндрів. Матеріал огинає циліндри, контактуючи з гарячою поверхнею.

9.3 Трубчасті сушарки

Трубчасті сушарки (рис.9.2) застосовуються головним чином для сушіння вугілля і містять похилий обертовий барабан, у днищах якого завальцьовані трубки діаметром 100/108*мм* для бурого і 119/128*мм* для кам'яного вугілля. Вони можуть застосовуватися і для інших подрібнених кускових матеріалів.

Вологий матеріал спеціальним пристосуванням – живильником – подається в трубки і при обертанні барабана пересувається по них до виходу для вивантаження.

Для кращого заповнення, перемішування і дроблення матеріалу з метою збільшення поверхні випаровування при обертанні барабана трубки всередині заповнені різними металевими вставками. Як грійний теплоносій застосовується пара з відбору турбіни тиском не вище $3{,}92 \cdot 10^5$ *Па*. Інтенсивність сушіння складає від 2 до 4,5 *кг/год* з 1 $м^2$ поверхні труб, витрата теплоти $q = 3200 \div 3800$ *кДж* на 1 *кг* вологи. Витрата електроенергії: від 5 до 6 *кВт·год* на 1 *к*г випаруваної вологи.

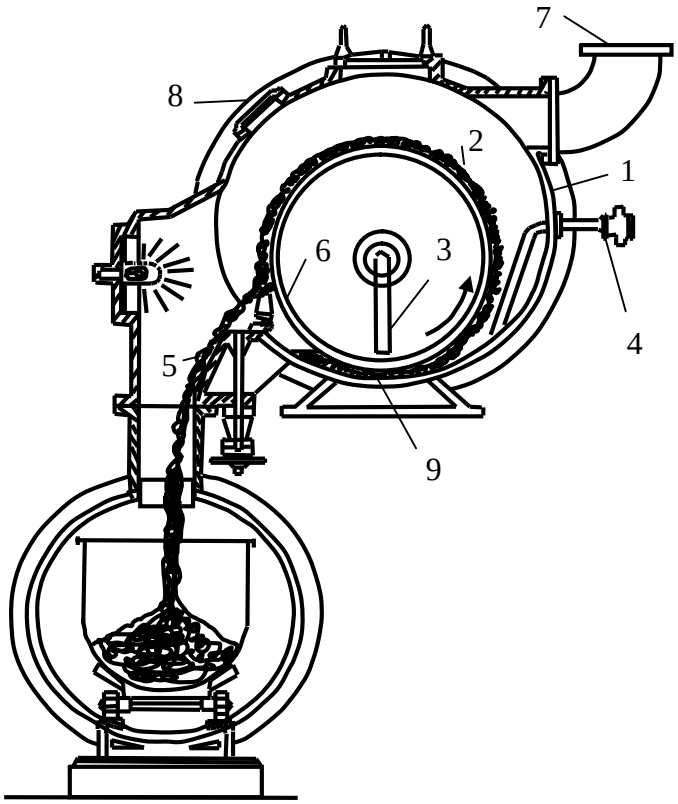


Рисунок 9.1 – Вальцьова вакуумна сушарка неперервної дії
1– корпус, 2 – валець, 3 – трубка для подачі гріючої пари, 4 – трубка для подачі матеріалу, 5 – висушений матеріал, 6 – ніж, 7 – труба для відведення пари з корпуса, 8 – скло для контролю процесу, 9 – змійовик

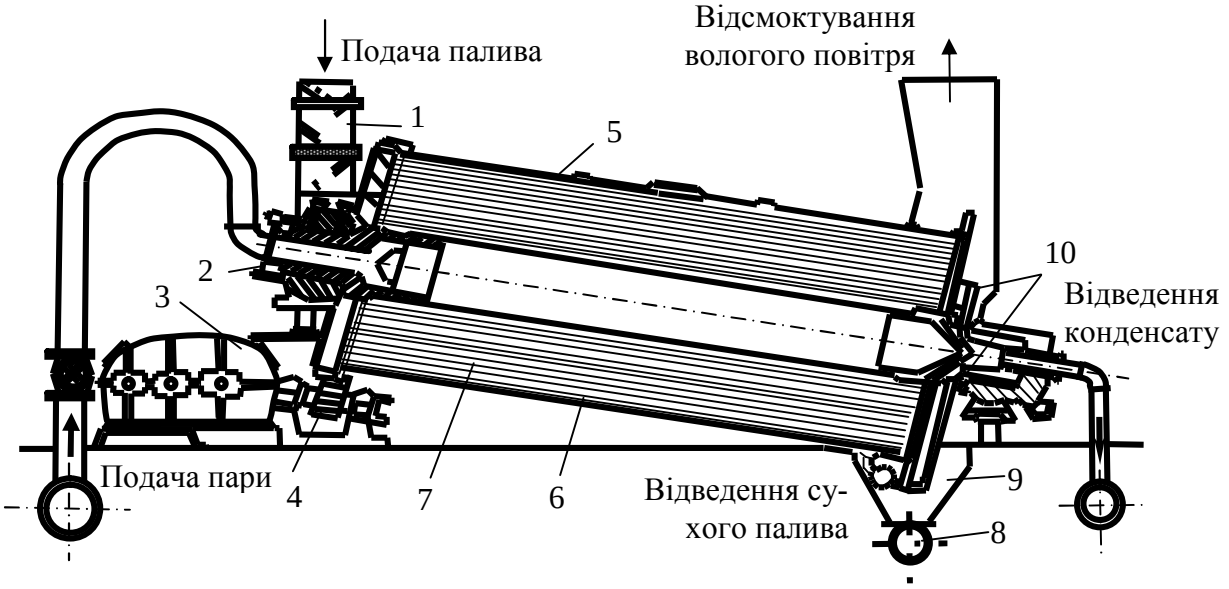


Рисунок 9.2 – Трубчаста сушарка
1 – завантажувальний пристрій для подачі вологого матеріалу; 2 – передня цапфа; 3 – редуктор; 4 – фрикційний привід; 5 – барабан трубчастої сушарки; 6 – трубки; 7 – гвинтові вставки в трубках; 8 – шнек; 9 – камера для вивантаження матеріалу; 10 – труби від черпаків для відведення конденсату

9.4 Вакуумні контактні сушарки

Вакуумні сушарки внаслідок складності і дорожнечі мають порівняно обмежене застосування і зустрічаються головним чином у хімічній промисловості.

Перевагою вакуум–сушарок у порівнянні з конвективними атмосферними сушарками є більш інтенсивне сушіння при низьких температурах, що важливо для речовин, які не витримують високої температури (термолабільних). Наприклад, для тиску грійної пари $2 \cdot 10^5$ *Па* ($t_н$ = 120°*С*), і вакуумі в камері $0{,}867 \cdot 10^5$ *Па*, температура матеріалу буде порядку 66°С, а перепад температур дорівнює 120 – 54 = 66°С проти 120 – 100 = 20°С при сушінні повітрям в атмосферних сушарках; випаровування з поверхні однакової величини для вакуумного сушіння теоретично повинне відбуватися в 2–3 рази швидше, ніж для атмосферного.

Вакуумне сушіння вимагає меншої витрати теплоти внаслідок (майже) відсутності втрат з повітрям, що викидається з сушарки. Наприклад, на 1 кілограм води, що випаровується при температурі 40°С, потрібно 2570*кДж* теплоти у вакуумній сушарці, а в атмосферній сушарці 3440 і 3860*кДж*, якщо повітря виходить з відносною вологістю φ відповідно 75 і 50%. Перевагою вакуум–сушарок є стерильність середовища. Герметичність сушильної камери дає гарантію проти забруднення продукту пилом з навколишнього середовища й окислювання його киснем повітря. Вакуумне сушіння дозволяє також виключити виділення з матеріалу шкідливих парів і газів у навколишнє середовище, що особливо важливо при сушінні отруйних речовин.

При сушінні під вакуумом є можливість більш повного вловлювання цінних чи шкідливих парів. Замість дорогої абсорбційної установки, що застосовується для поглинання таких парів при атмосферному сушінні, у вакуум–сушарці застосовується більш дешевий і радикальний засіб вловлювання парів шляхом конденсації (до 95% таких летких розчинників, як етиловий спирт, ацетон тощо). Нарешті, при вакуумному сушінні менші втрати продукту й у вигляді пилу і менша пожежна небезпека.

До недоліків сушіння під вакуумом варто віднести високу вартість сушильного агрегату внаслідок складності його конструкції і наявності спеціальної конденсаційної установки та труднощі контролю процесу сушіння під час роботи сушарки, тому що відкривання люків сушарки порушує вакуум. Незважаючи на ряд переваг, вакуум–сушарки через їх складність застосовуються тільки в тих випадках, коли це викликано технологічними особливостями обробки матеріалу, що висушується.

Для теплового розрахунку контактних сушарок необхідно визначити коефіцієнт теплопередачі від грійного теплоносія через обмежувальну стінку до поверхні матеріалу, визначення якого, як правило, є досить складним.

10 ПРОГРЕСИВНІ СПОСОБИ СУШІННЯ

10.1 Сублімаційні сушарки

Сублімація – це процес випаровування твердого тіла, тобто перетворення його безпосередньо в газоподібний стан без проміжного проходження через рідкий, і є процесом зневоднювання чи сушіння матеріалу в *замороженому* стані.

Сублімаційне сушіння в залежності від виду матеріалу проходить із залишковим тиском 0,2–2 *мм. рт. ст.* Процес сублімаційної сушіння матеріалу в замороженому стані протікає з постійним поглибленням поверхні випаровування і може характеризуватися двома періодами сушіння з постійною і падаючою швидкістю сушіння (при видаленні зв'язаної вологи). Температура матеріалу в перший період залишається постійною і підвищується в другий період сушіння.

Теплота на випаровування береться з навколишнього середовища через теплопровідні стінки камери чи від спеціальних тепловипромінювальних підігрівників, у яких іноді циркулює вода з температурою 40—60°С.

Принципова схема установки для сублімаційного сушіння, показана на рис. 10.1, не відрізняється від схеми вакуум–сушарки.

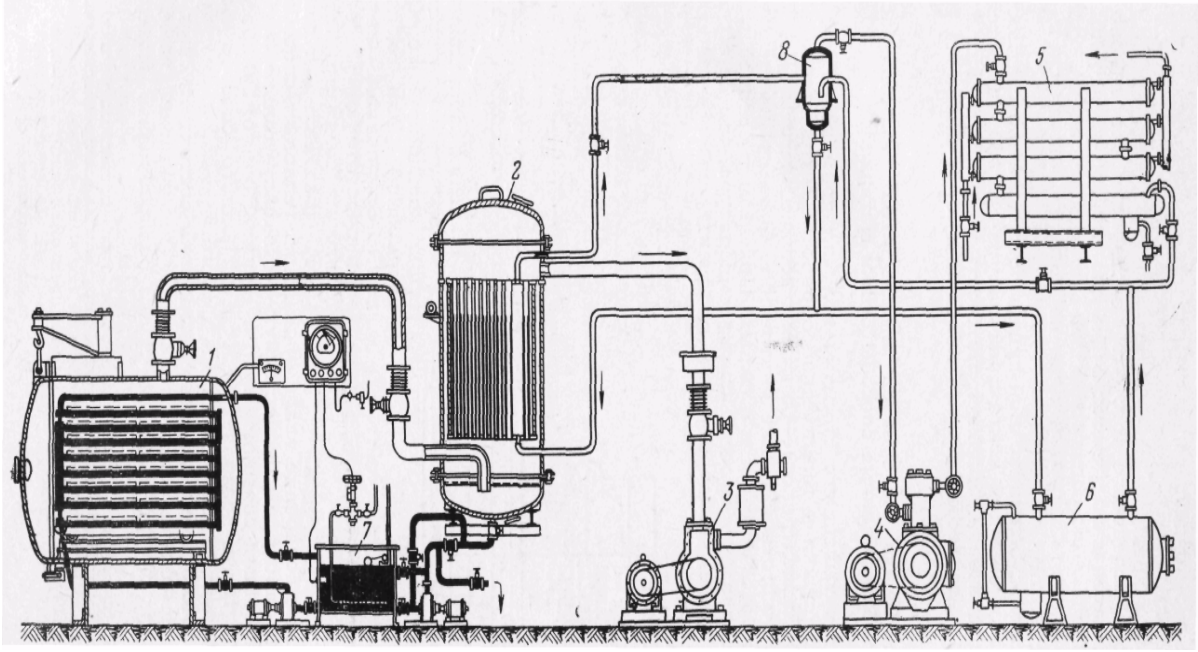


Рисунок 10.1 – Принципова схема сублімаційної сушильної установки
1 – субліматор із грійними плитами і піддонами для продуктів; 2 – конденсатор-виморожувач пари із субліматора–випарника холодильної установки; 3 – вакуумний насос з електродвигуном; 4 – компресор холодильної установки з електродвигуном; 5 – трубчастий елементний конденсатор холодильної установки; 6 – аміачний ресивер; 7 – бак для гарячої води з електронасосами для розтоплення льоду в конденсаторі і субліматорі; 8 – сепаратор вологи

Сушіння сублімацією застосовується в наш час для дуже чутливих до нагрівання матеріалів, наприклад, біологічних фармацевтичних препаратів

(пеніцилін, стрептоміцин, кров'яна плазма, біопрепарати і т.п.), а також для деяких харчових продуктів (м'ясо, риба, ягоди, фрукти тощо). Висушений таким способом матеріал має пористу губчату будову, зберігає повну біологічну активність, розчинність і допускає тривале зберігання.

Різниця полягає в тому, що конденсатор охолоджується не водою, а циркулюючим через холодильну установку соляним розчином, температура якого підтримується в межах від –20 до –40 °С відповідно до необхідного вакууму. Внаслідок того, що конструкція безупинно діючих конденсаторів виходить дуже складною через необхідність зняття і видалення льоду, що утворюється з пари під час роботи установки, у наш час застосовують схеми з двома конденсаторами, один із яких знаходиться в роботі, а в іншому тане лід.

Недоліками сублімаційного сушіння в порівнянні з атмосферним конвективним чи звичайним контактним вакуум–сушінням є висока вартість установки, складність її експлуатації і значна витрата електроенергії на роботу холодильної установки і вакуум–насос.

10.2 Сушіння матеріалів в полі струмів високої частоти і комбіновані способи сушіння матеріалів

У 30–х роках минулого сторіччя набув застосування новий спосіб інтенсивного сушіння і термічної обробки матеріалів (електропровідників і діелектриків) – струмами високої частоти.

У високочастотному сушінні, внутрішні, більш вологі шари матеріалу, нагріваються швидше зовнішніх. При цьому в середній частині матеріалу встановлюється більш висока температура, ніж на його поверхні. Під дією температурного градієнта волога інтенсивно переміщається до поверхні, завдяки чому швидкість сушіння матеріалів збільшується іноді в десятки разів. Однак цей спосіб сушіння не одержав широкого промислового застосування внаслідок значної витрати електроенергії (2,5 – 4 *кВт·год/кг* випаруваної вологи) і високої вартості сушіння.

З метою зниження витрати енергії високочастотне сушіння часто комбінують з терморадіаційним чи конвективним, витрачаючи, високочастотну енергію тільки на створення необхідного градієнта температур в середині матеріалу, випаровування вологи роблять тепловим способом чи включають у роботу високочастотну установку тільки в момент видалення з матеріалу зв'язаної вологи. Застосування комбінованих способів підведення теплоти дозволяє недоліки одного способу підведення теплоти компенсувати перевагами іншого.

Всі високочастотні сушильні установки складаються з двох основних елементів: високочастотного генератора і сушильної камери. Але оскільки в сушарках проводять сушіння різноманітних матеріалів, то вони розрізняються конструкцією сушильної камери, конструкцією генератора, частотою струму й розташуванням електродів.

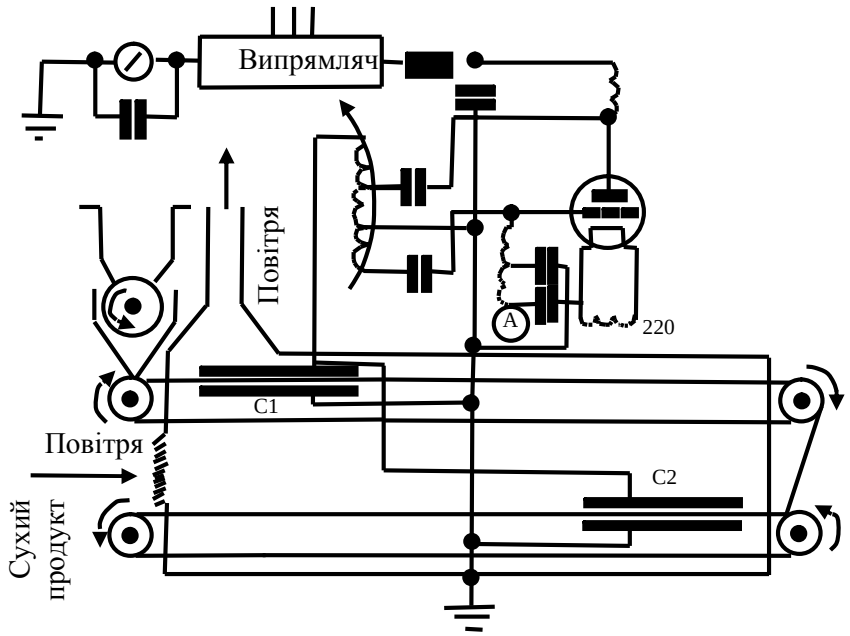


Рисунок 10.2 - Схема сушарки для сушіння порошків струмами високої частоти

На рис. 10.2 показана принципова схема високочастотної стрічкової сушильної установки для порошкоподібних матеріалів.

Необхідно відзначити, що в більшості конвективних, контактних і терморадіаційних сушарках відбувається складний теплообмін і їхня назва визначається тим способом підведення теплоти, що має визначальний вплив на інтенсивність сушіння матеріалу.

Перспективним є комплексне застосування різних типів сушарок, наприклад, комбінація розпилювальної сушарки з досушуванням у киплячому шарі, пневмосушилки із наступним сушінням у киплячому шарі тощо.

Дуже перспективним є суміщення в одному агрегаті процесу сушіння з іншими технологічними процесами, наприклад: сушіння і розмелювання чи подрібнення матеріалу, сушіння і випалювання, сушіння і полімеризацію тощо.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Вкажіть області раціонального застосування природного і штучного сушіння матеріалів.

2. Чим відрізняється процес випаровування від процесу кипіння чи випарювання? Яка волога має найбільшу і яка найменшу енергію зв'язку з матеріалом?

3. Як називаються періоди сушіння матеріалу? Поясніть, як змінюються вологість і температура матеріалу в ці періоди.

4. Що таке критична вологість матеріалу? Яку кінцеву вологість повинен мати матеріал: а) щоб був відсутній період падаючої швидкості сушіння; б) щоб був відсутній період постійної швидкості сушіння?

5. Що таке гігроскопічна вологість і яке вона має практичне значення? Яка вологість має більше чисельне значення при сушінні матеріалів: критична чи гігроскопічна? Для яких матеріалів ця різниця більша: товстих чи тонких і як вона змінюється з підвищенням швидкості сушіння?

6. Що таке рівноважна вологість і як вона змінюється з підвищенням і зниженням температури і відносної вологості сушильного агента?

7. Що таке градієнт вологості в матеріалі? У яких випадках відбувається розтріскування матеріалу і які заходи для його усунення?

8. Від яких параметрів залежить інтенсивність випаровування вологи з поверхні матеріалу?

9. Напишіть рівняння переносу вологи в матеріалі при температурі його до 100 °С і вище (для високотемпературного сушіння). Якими градієнтами визначається перенос вологи з матеріалу при його низькотемпературному і високотемпературному сушінні?

10. Чим відрізняється локальна вологість u, що використана в диференціальних рівняннях, від середньої вологості матеріалу w?

11. Вкажіть, який градієнт визначає перенос вологи в матеріалі при конвективному, контактному і терморадіаційному сушінні і при сушінні матеріалу в полі струмів високої частоти. Який градієнт затримує чи гальмує переміщення вологи з центра матеріалу до його поверхні? Як змінюються t і u всередині і на поверхні матеріалу при цих способах сушіння?

12. Напишіть диференціальне рівняння термовологопровідності для низькотемпературного і високотемпературного сушіння. Яку основну задачу вони вирішують і при яких граничних умовах?

13. Напишіть формули для визначення витрат сухого повітря і теплоти на 1 кг випаруваної вологи.

14. Чи є втрати теплоти в теоретичній сушарці? Зобразіть на h–d–діаграмі процес в теоретичній сушарці з однократним використанням сушильного агента.

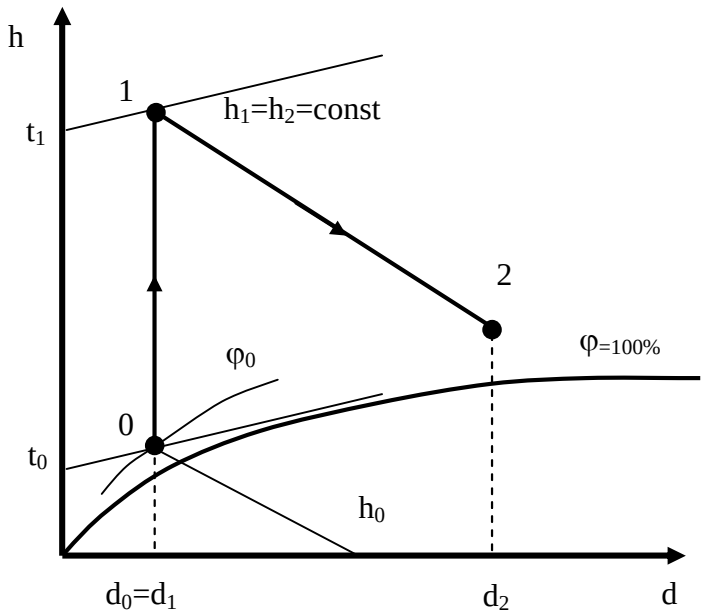
15. Чим відрізняється дійсна сушарка від теоретичної? Що означає величина Δ в дійсній сушарці? Які вона може мати значення і як від її значення змінюються питомі витрати повітря і теплоти на 1 кг випаруваної вологи?

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ СУШАРКИ

Розрахувати прямотокову пневматичну трубу-сушарку за даними Видатність сухого матеріалу $G_м$=500 *кг/год*; вологості матеріалу ω_1=0,25, ω_2=0,03, $\omega_{кр}$=0,08 *кг/кг*; середній діаметр частинок $d_е$=0,5 *мм*; фактор форми частинок ?=1,2; теплоємність сухого матеріалу *См*=1,55 *кДж/(кг·К);* густина матеріалу $\rho_м$=1450 *кг/м*?; температури висушуваного матеріалу $t_{м1}$=20?С, $t_{м2}$=60?С; температура повітря перед робочою камерою t_1=140?С; параметри навколишнього повітря: φ_0=90%, t_0= – 2?С; витрата повітря $G_{пв}$ =6600 *кг/год*.

Розрахунок

1. Будуємо на *h-d* діаграмі процес нагрівання повітря в калорифері (φ_0=90%, t_0= – 2?С, t_1=140?С, лінія 0-1) і визначаємо параметри в точках 0 і 1: h_0= 6 *кДж /кг*; d_0=0,003 *кг/кг*; h_1=148 *кДж/кг.*



2. Кількість випаруваної вологи, *кг/год*:

$$W= G_M(\omega_1- \omega_2)=500(0,25-0,03)=110$$

3. Питома витрата повітря, *кг/кг*: $l_0= G_{пв}/W$=6600/110=60
4. Кінцевий вологовміст повітря, *кг/кг*: $d_2= d_0+1/l$=0,003+1/60=0,017
5. Питомі втрати теплоти *кДж/кг*:

   на нагрівання матеріалу

   $q_v= G_м (C_м+C_в\omega_2)(t_{м2}- t_{м1})/W$ = 500(1,55+4,187·0,03)·(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_5=280 *кДж/кг*.

6. Значення сумарних втрат теплоти в сушарці, *кДж/кг*

$$\Delta= C_в t_{м1} – (q^м+ q_{зв}+ q_5) = 4,187\cdot20 - (305+280+25)= -565.$$

7. З побудови робочого процесу в сушильній камері на діаграмі визначаємо температуру сушильного агента на виході з сушарки: t_2=95?С.

8. Середні параметри повітря в сушарці:

$$t_{ср} =0,5(t_1+ t_2)=0,5(140+95)=117,5?С$$

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

9. Фізичні властивості сушильного агента:

$$\rho_{см}= 0,9\ кг/м?;\ ?_{см}=22,9\cdot10^{-6}\ Па\cdot с;\ C_{см}=1,02 кДж/(кг\cdot К);$$

$$\lambda_{см}=2,66\cdot10^{-2}\ Вт/(м\cdot К);\ a_{см}= \lambda_{см}/(\rho_{см}\cdot C_{см})= 2,66\cdot10^{-2}/(1,02\cdot10^3\cdot0,9)=28,9\cdot10^{-6}$$

$$м^2/с;\ Pr_{см}=\nu_{см}/a_{см}= ?_{см}/(\rho_{см}\cdot a_{см})=22,9\cdot10^{-6}/(1,02\cdot28,9\cdot10^{-6})=0,776.$$

10. Об'ємна і середня густина матеріалу, *кг/м?*

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

$$\bar{\rho}_м= \rho_v (1+ \bar{\omega}_2) =1400[1+0,5(0,25+0,03)] = 1605.$$

11. Об'ємна втрата повітря, *м?/с*

$$V_{см}= G_{пв} (1+d_{ср})/(\rho_{см}\cdot3600) = 6600(1+0,0086)/(0,9\cdot3600) =2.$$

12. Критерій Архімеда

$$Ar = \rho^*g\cdot d_e^3/\nu_{см}^2= 1782\cdot9,8(0,5\cdot10^{-3})^3/(23,9\cdot10^{-6})^2 = 3794$$

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

13. Критерій Рейнольдса для витання

$$Re_{во} = Ar/(18+0,61\cdot Ar^{0,5}) = 3794(18+0,61\cdot3794^{0,5})=68,3$$

14. Швидкість витання сферичної частинки, *м/с*

$$V_{во}= Re_{во}\cdot\nu_{см}/d_e = 68,3\cdot23,9\cdot10^{-6}/0,5\cdot10^{-3} = 3,4$$

15.Фактор обтікання:

$$\Phi = f^{0,9}\ \mathrm{Re}_{во}^m = 1,2^{0,9}\cdot68,3^{0,5} = 1,56$$

16 Швидкість витання частинок, м/с

$$V_в = V_{во} \cdot Ф^{0,5} = 3,4 \cdot 1,56^{0,5} = 2,65$$

17. Швидкість повітря в сушарці, м /с

$$W_г = 2V_в = 2 \cdot 2,65 = 5,3.$$

18. Критерій Рейнольдса відносного руху частинок

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

19. Критерій Нуссельта міжфазного теплообміну

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

20. Коефіцієнт міжфазного теплообміну, *Вт/(м^2·К)*

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

21. Температурний потенціал сушарки , ?С

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

22. Питома поверхня дисперсної фази , *1/м*

$$S = 6?/d_e = 6 \cdot 1,2 / 0.5 \cdot 10^{-3} = 14400$$

23. Питома втрата повітря, кг/кг

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

24. Тривалість сушіння, с

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

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.

25. Значення коефіцієнтів і тривалість проходження розгінної ділянки, *с*

a=11; b=1.18; $k_ф$=2,67; d=-44.2; c=6.6; A=3.6; B=-2.5; U_k=2.8.

$$\tau_p = \ln\{[(2,8+3,6)(5,3-2,5)]/[(2,8-2,5)(5,3+3,6)]\}/6,6 = 0,29$$

26. Висота розгінної ділянки за (2.9), *м*

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

де x =[(5,3+3,6)exp(0,29·6,6)-(5,3-2,5)]/(3,6+2,5) = 313,68.

27. Загальна висота труби-сушарки, *м*

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

28. Масова концентрація дисперсної фази, *кг/кг*

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

де:

$$G_1 = G_M(1+\omega_1) = 500(1+0,25) = 625;$$

$$G_2 = G_M(1+\omega_2) = 500(1+0,0,3) = 515.$$

29. Діаметр труби – сушарки, *м*

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

Приймаємо $D = 0,7$ м.

30. Поверхня теплообміну апарата, $м^2$

$$F = П\cdot d\cdot h = 3.14\cdot 0.7\cdot 11.1 = 24.5$$

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

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

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

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

За температурний напір можна прийняти значення, ?С

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

32. 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 менш як на 5%, розрахунки можна не уточнювати.

33. Коефіцієнти аеродинамічного опору в трубі:

- за довжиною 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 $Fr = gD/w_г^2 = 9{,}81\cdot 0{,}7/5{,}3^2 =0{,}244$;

- коефіцієнт втрат на розгінній ділянці

$$\xi_р=2\cdot 0{,}086[0{,}95(1-2{,}65/5{,}3) – 0{,}8\cdot 15{,}3] = 0{,}07;$$

- сумарний коефіцієнт місцевих втрат для частинок

$$\xi_{мт}= 1\cdot 0{,}086=0{,}086;$$

- загальний коефіцієнт опору

$$\xi_З= 0{,}256+0{,}42+0{,}07+1+0{,}086=1{,}454$$

- затрати напору в трубі – сушарці, *Па*

$$\Delta P_{тс}=0{,}5\xi_З\cdot\rho_{см}w_г^2 = 0{,}5\cdot 1{,}454\cdot 0{,}9\cdot 5{,}3^2 = 18{,}4.$$

34. Приймаємо втрати напору в циклоні $\Delta P_ц = 600 Па$; у мультициклоні $\Delta P_{мц}= 500 Па$ і у фільтрі $\Delta P_ф = 100 Па$.

35. Загальні втрати напору в сушильній установці, *Па*

$$\Delta P_у =18{,}4+600+500+100=1218{,}4.$$

36. Розрахунковий напір вентилятора, Па

$$H_в= 1{,}1\Delta P_у = 1{,}1\cdot 1218{,}4 = 1340.$$

37. Необхідна потужність привода вентилятора, *Вт*

$$N_в = G_{см}H_в/(3600\cdot\rho_{см}\cdot\eta_в\cdot\eta_{пр}) = 6600\cdot 1340/(3600\cdot 0{,}9\cdot 0{,}7\cdot 0{,}98)=3940.$$

38. Питома витрата електроенергії, *кВт/кг*

$$q_е= N_в\cdot 10^{-3}/W=3940\cdot 10^{-3}/110 = 0{,}0358$$

39. Питома витрата теплоти на випаровування , *кДж/(кг·К)*

$$q= l\,(h_1-h_0)=60(148-6) = 8520.$$

40. Загальна питома потужність, *кВт/кг*

$$q_З= q/3600+q_е =8520/3600+0{,}0358 = 2{,}4.$$

ЛІТЕРАТУРА

1 Тепло–масообменные аппараты и установки //Под ред. Б. А. Левченко. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 387 с.

2. А. С. Гинзбург. Основы теории и техники сушіння пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 527 с.

3. П. Д. Лебедев Теплообменные, сушильные и холодильные установки. – М.: Энергия, 1972.– 320с.

4. А. С. Гинзбург. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности.– М.: Агропромиздат, 1985.–336с.

5. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии.– М.: Химия, 1968.– 847с.

6. Чернобыльский И. И., Тананайко Ю. М. Сушильные установки химической промышленности.– К.: Техніка, 1969.–279с.

7. Атаманюк В. М. Зовнішній тепломасообмін під час фільтраційного сушіння //Промышленная теплотехника.- 2006, Т.28,- №5, - С.47-54.

8. Кіндзера Д. П., Ханик Я. М., Атаманюк В. М. Гідродинамічні особливості при сушінні дисперсних матеріалів у щільному шарі //Науковий вісник УкрДЛТУ: Збірник наук.-техн. праць.- Львів: 2003.- Вип.13.1.- С.126-133.

Словник

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

нестаціонарні необоротні - irreversible transient

інтенсивність сушіння - intensity of drying

рушійна сила переносу - motive force of transfer

осмотичний тиск - osmolality pressure

криві сушіння - curves dryings

вологість - humidity

температура мокрого термометра - temperature of the wet thermometer

адіабатне випаровування - adiabatic evaporation

перша критична точка - first critical point

усадка – squeezing

терморадіаційне сушіння - thermoradiatic drying

потенціалопровідність - conductivity of potential

сорбція - persorbtion

десорбція - desorbtion

гістерезис – hysteresis

капілярно-пористі тіла - capillaries of pore bodies

Додаток А

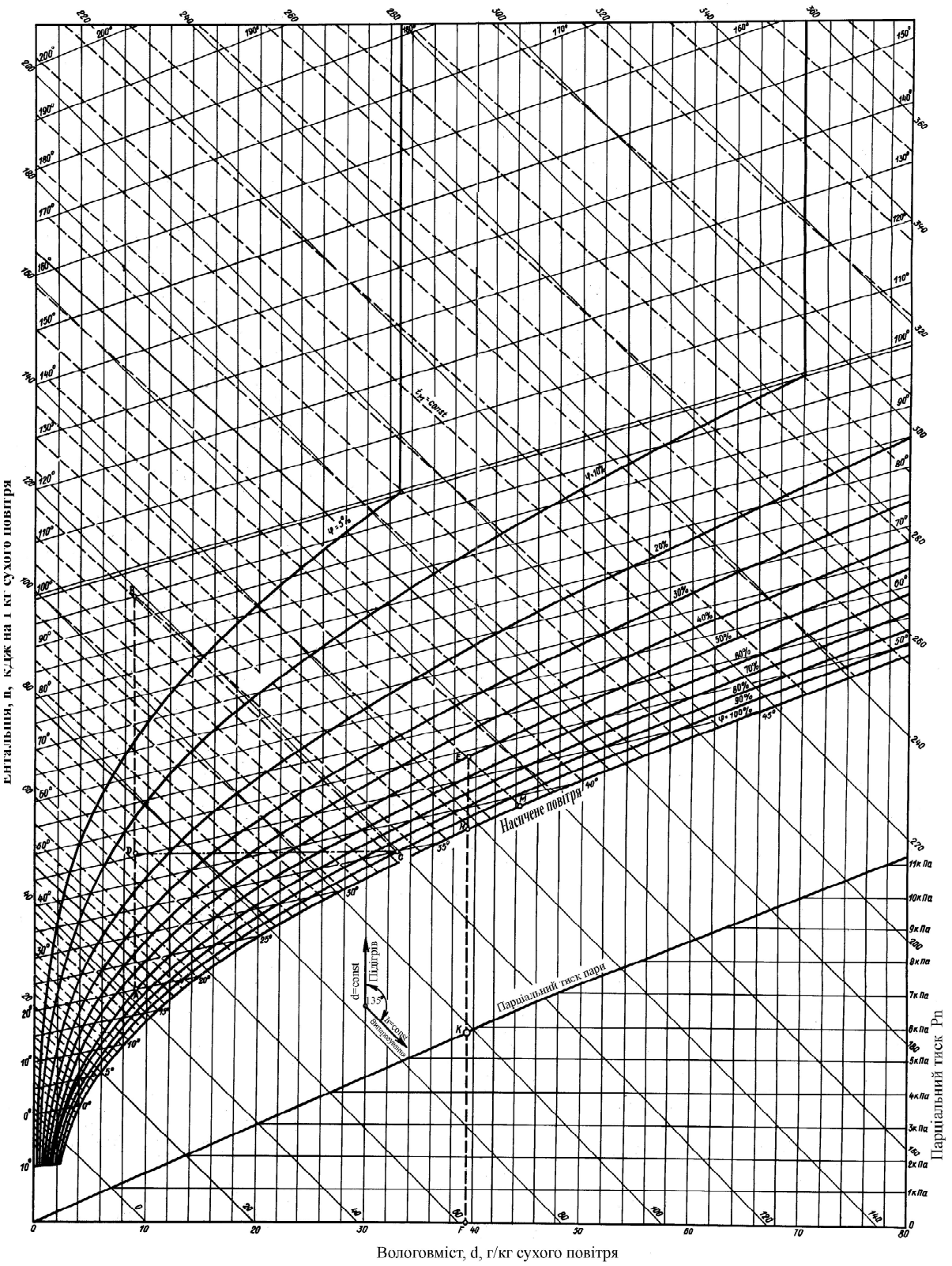


Рисунок А1.1 – h-d діаграма вологого повітря

Додаток Б

Таблиця Б1.1 – Теплофізичні властивості води на лінії насичення

t, ^{0}C	P, бар	ρ, кг/м^3	C_p кДж/(кг·град)	λ , Вт/(м·град)	a, 10^7 м^2/с	μ , 10^6, Н · с / м^2	ν , 10^6, м^2 / с	β , 10^4 1/град	σ , 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 В1.1 – Теплофізичні властивості водяної пари на лінії насичення

t, ^{0}C	P, 10^5 бар	ρ'', кг / м^3	i'', кДж / кг	r, кДж / кг	C_p кДж /(кг· град)	λ, 10^2 Вт / (м·град)	a, 10^6 м^2 / с	μ, 10^6, Н · с / м^2	ν, 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	1476,3	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 Г1.1 – Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмосферного тиску

t, °С	ρ, кг/м^3	C_p, кДж/кг°С	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/м°С	$a \cdot 10^6$, 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 Д1.1 – Термодинамічні властивості вологого повітря (р = 100 кПа = 750 мм рт.ст.)

t, °C	$P_{П}$, Па	d", г/кг	$c_{p,\,с'}$, кДж/(кг·К)	c_{p}, кДж/(кг·К)	$i_{С}$, кДж/кг	$i''_{П}$, кДж/кг	i'', кДж/кг	$\rho_{с}$, 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 Д1.1

t, °C	$P_{п}$, Па	d", г/кг	$c_{p,с'}$, кДж/(кг·К)	c_{p}, кДж/(кг·К)	$i_{С}$, кДж/кг	$i''_{п}$, кДж/кг	i'', кДж/кг	$\rho_{с}$, 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 Е1.1 – Теплофізичні властивості димових газів

(В=760 мм рт.ст. $\approx 0{,}01 \cdot 10^5$ Па; $\bar{p}(CO_2) = 0{,}13$; $\bar{p}(H_2O) = 0{,}11$; $\bar{p}(N_2) = 0{,}76$)

t, ^{0}C	ρ, кг/м^3	c_p, кДж/(кг·К)	λ, 10^2 Вт/(м·К)	a, 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

Навчальне видання

Станіслав Йосипович Ткаченко
Олександр Юрійович Співак

СУШИЛЬНІ ПРОЦЕСИ ТА УСТАНОВКИ

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено Співаком О. Ю.

Редактор В. О. Дружиніна
Коректор З. В. Поліщук

Науково-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7х42?
Друк різографічний
Тираж прим.
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.