

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ № 9
«СУШІННЯ МАТЕРІАЛІВ ПОВІТРЯМ»**

**З ДИСЦИПЛІН «ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІКО-ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ВИРОБНИЦТВ», «ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ ТА
ОБЛАДНАННЯ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ
ЗА ОСВІТНІМ РІВНЕМ «БАКАЛАВР»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «161 ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ІНЖЕНЕРІЯ», «015 ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА», «181 ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ»,
«226 ФАРМАЦІЯ», «162 БІОТЕХНОЛОГІЇ ТА БІОІНЖЕНЕРІЯ»,
«101 ЕКОЛОГІЯ», «263 ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА»,
«151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ»**

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ № 9
«СУШІННЯ МАТЕРІАЛІВ ПОВІТРЯМ»
З ДИСЦИПЛІН «ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІКО-ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ»,
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ВИРОБНИЦТВ», «ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ ТА
ОБЛАДНАННЯ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ
ЗА ОСВІТНІМ РІВНЕМ «БАКАЛАВР»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «161 ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ІНЖЕНЕРІЯ», «015 ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА», «181 ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ»,
«226 ФАРМАЦІЯ», «162 БІОТЕХНОЛОГІЇ ТА БІОІНЖЕНЕРІЯ»,
«101 ЕКОЛОГІЯ», «263 ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА»,
«151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

Затверджено на засіданні
кафедри процеси, апарати та загальна
хімічна технологія.

Протокол № 8 від 19.05.2023 р.

Дніпро 2024

Методичні вказівки до лабораторних занять № 9 «Сушіння матеріалів повітрям» з дисциплін «Процеси та апарати хімічних виробництв», «Процеси та апарати харчових виробництв», «Процеси та апарати хіміко-фармацевтичних виробництв», «Процеси та апарати біотехнологічних виробництв», «Процеси та апарати природоохоронних технологій», «Процеси та апарати виробництв», «Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації за освітнім рівнем «Бакалавр» для студентів спеціальності «161 Хімічні технології та інженерія», «015 Професійна освіта», «181 Харчові технології», «226 Фармація», «162 Біотехнології та біоінженерія», «101 Екологія», «263 Цивільна безпека», «151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Укл.: Скар Ю.Є., Гриднева Т.В., Рябік П.В., Ляшенко А.О. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2024. – 9 с.

Укладачі: Ю.Є. Скар, д-р хім. . наук
Т.В. Гриднева, канд. техн. наук
П.В. Рябік, канд. техн. наук
А.О. Ляшенко

Відповідальний за випуск Скар Ю.Є, д-р хім. наук, проф.

Навчальне видання

Методичні вказівки до лабораторних занять № 9 «Сушіння матеріалів повітрям» з дисциплін «Процеси та апарати хімічних виробництв», «Процеси та апарати харчових виробництв», «Процеси та апарати хіміко-фармацевтичних виробництв», «Процеси та апарати біотехнологічних виробництв», «Процеси та апарати природоохоронних технологій», «Процеси та апарати виробництв», «Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації за освітнім рівнем «Бакалавр» для студентів спеціальності «161 Хімічні технології та інженерія», «015 Професійна освіта», «181 Харчові технології», «226 Фармація», «162 Біотехнології та біоінженерія», «101 Екологія», «263 Цивільна безпека», «151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Укладачі: СКНАР Юрій Євгенович
ГРИДНЄВА Тетяна Василівна
РЯБІК Павло Васильович
ЛЯШЕНКО Анна Олександрівна

Авторська редакція

Підписано до друку 23.02.24. Формат 60×84/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов. друк. арк. 0,45. Обл.-вид. арк. 0,51. Тираж 100 прим. Зам. № 257.
Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015

ДВНЗ УДХТУ, просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005

Редакційно-видавничий відділ

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Сушінням називається процес видалення вологи з вологих матеріалів шляхом підведення тепла для випаровування вологи в навколишнє середовище.

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

Відношення маси вологи до маси абсолютно сухого матеріалу називається **вологівмістом матеріалу**:

$$\omega^c = G_B / G_C,$$

а відношення маси вологи в матеріалі до маси вологого матеріалу – **вологістю**:

$$\omega = G_B / G_M.$$

Властивості вологих матеріалів значною мірою залежать від виду вологи, яка у них міститься.

Розрізняють **вільну вологу**, швидкість випаровування якої з матеріалу дорівнює швидкості випаровування її з відкритого дзеркала цієї рідини, та **зв'язану вологу**, яка має меншу швидкість випаровування, ніж з відкритого дзеркала рідини.

При вологовмісту матеріалу більшому від **гігроскопічного**, який визначається як найбільше насичення матеріалу зв'язаною вологою, вільна волога випаровуватиметься з матеріалу до досягнення гігроскопічного вологовмісту в **першому періоді** сушіння. Після цього в **другому періоді** сушіння почне випаровуватися зв'язана волога до досягнення **рівноважного вологовмісту**, коли кількість випарюваної вологи з матеріалу дорівнює кількості поглиненої вологи з навколишнього середовища.

Під **швидкістю сушіння** мають на увазі зміну вологовмісту матеріалу в одиницю часу:

$$v = d\omega^c / d\tau.$$

Швидкість сушіння залежить від виду вологи (вільна чи зв'язана), швидкості підведення тепла та стану навколишнього середовища. Якщо підводиться тепло до матеріалу нагрітим газом, то таке сушіння називається **конвективним**, а газ – **сушильним агентом**.

Дослідні криві сушіння та зміна температури вологого матеріалу за часом показані на рис. 1.

Крива сушіння АВСДЕ має кілька характерних частин: АВ – нагрівання матеріалу до **температури мокрого термометра** сушильного агента, коли все тепло підведене до матеріалу сушильним агентом витрачається на випаровування води. При досягненні матеріалом температури мокрого термометра температура його залишається постійною, а зміна вологовмісту стає пропорційною часу сушіння, доки не випарується уся вільна вода з матеріалу. Цей період називається **першим періодом** сушіння. Далі, у **другому періоді** сушіння, швидкість сушіння увесь час спадатиме (крива СДЕ), оскільки частина тепла сушильного агента, витрачається ще й на нагрівання матеріалу зі зв'язаною водою. При цьому температура матеріалу поступово збільшується до температури сушильного агента, а вологовміст матеріалу змінюється від гігроскопічного (точка С, що відповідає першій критичній вологості $\omega_{кр1}^c$) до рівноважного на поверхні матеріалу (точка Д, що відповідає другій критичній вологості $\omega_{кр2}^c$) і далі до рівноважного по всій товщині матеріалу (точка Е).

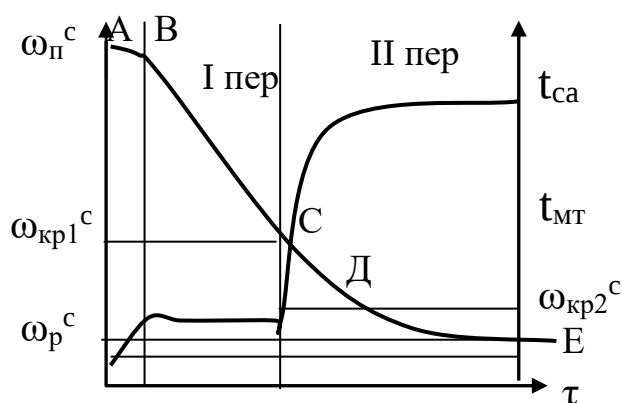


Рис. 1. Крива сушіння

Крива швидкості сушіння (рис. 2) одержується шляхом диференціювання кривої сушіння (рис. 1), на якій маємо також частини кривої АВСДЕ: ВС – перший період сушіння, коли швидкість сушіння незмінна, СДЕ – другий період сушіння, на якому швидкість сушіння весь час падає.

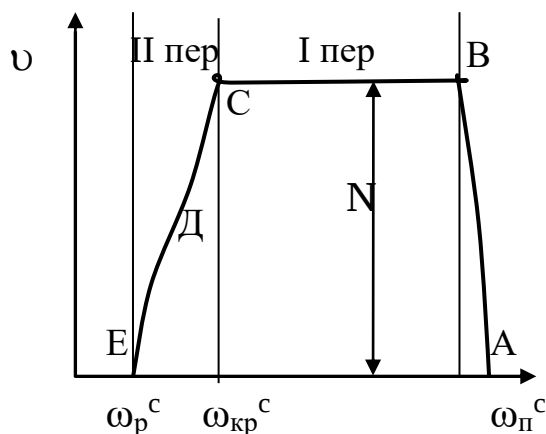


Рис. 2. Крива швидкості сушіння

У першому періоді швидкість сушіння незмінна та пропорційна кількості підведеного тепла:

$$\nu_1 = (\omega_{\Pi}^C - \omega_{KP}^C) / \tau_1.$$

Швидкість випаровування вологи у другому періоді сушіння, як бачимо на рис. 2, є складною функцією часу та вологовмісту. Якщо замінити цю складну функцію прямою пропорційністю, що в деяких випадках припустимо, швидкість сушіння протягом другого періоду визначиться:

$$\nu_2 = K_C (\omega^C - \omega_P^C).$$

Константа швидкості сушіння у другому періоді K_C визначиться з умови рівності швидкостей сушіння наприкінці першого періоду та на початку другого:

$$\nu_1 = N = K_C (\omega_{KP1}^C - \omega_P^C),$$

звідки:

$$K_C = N / (\omega_{KP1}^C - \omega_P^C).$$

2. МЕТА РОБОТИ

Вивчення основних закономірностей процесу сушіння на прикладі сушіння вологого матеріалу гарячим повітрям.

3. ОПИС УСТАНОВКИ СУШІННЯ

Установка, схема якої наведена на рис. 3, складається з відцентрованого вентилятора 1, що подає повітря до калорифера 2, в якому повітря підігрівається. Далі гаряче повітря потрапляє до сушильної камери 3, де віддає своє тепло матеріалу, який знаходиться на лотку 4, за рахунок чого волога випаровується з матеріалу у повітря. Зволожене повітря видаляється з сушарки у навколишнє середовище. Лоток зв'язаний з терезами 5, за допомогою яких фіксують масу вологого матеріалу під час експерименту.

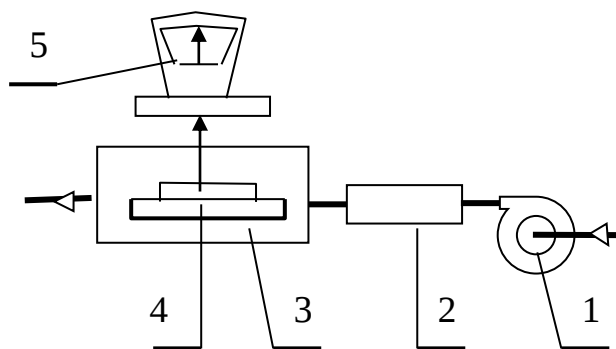


Рис. 3. Схема лабораторної установки:
1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – сушильна камера;
4 – лоток для матеріалу; 5 – терези

4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Визначити масу сухого матеріалу, зняти показники стану свіжого повітря за даними психрометра та занести до таблиці 1 умов сушіння.

Таблиця 1

Умови сушіння

Матеріал		Стан свіжого повітря		Температура підігріву повітря
Вид	Маса абс. сух. $G_{с,з}$	$t_{св}$	$t_{мт}$	$t_{п}$

2. Увімкнути вентилятор, встановити частоту обертання 500 об/ хв.

3. Увімкнути калорифер, встановити ЛАТРом напругу живлення до 120 В.

4. Слідкувати за показниками температури нагріву повітря. Після досягнення температури 110 С відрегулювати напругу ЛАТРом таким чином, щоб температура не змінювалася під час експерименту.

5. Зволожити матеріал, помістити у лоток, останній встановити на підвісці, зв'язаній з терезами, у сушильну камеру. Зачинити камеру.

6. Наступні показники маси та тривалості сушіння знімати кожні 2 хвилини до постійної ваги висушеного матеріалу та заносити їх до таблиці 2 дослідних даних.

Таблиця 2

Дослідні дані

Тривалість сушіння, τ , хв.	Маса вологого матеріалу, $G_M, \text{г}$.	Вологовміст матеріалу $\omega^C = (G_M - G_C)/G_C$ кг/кг.
0		
2		
4		

7. Після досягнення постійної ваги матеріалу вимкнути напругу, подану на калорифер, потім на вентилятор.

5. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

5.1. За даними табл. 2 побудувати у відповідних координатах криву сушіння.

5.2. Заповнити таблицю 3 для побудови графіка швидкості сушіння за усередненою кривою сушіння. Для цього весь інтервал зміни вологовмісту матеріалу поділити на декілька частин та у точках з вологовмістом наприкінці кожної частини провести дотичну до кривої сушіння. Для кожної дотичної встановити тангенс кута її нахилу, для чого зняти значення вологовмістів у відповідних точках перетину дотичної з віссю вологовмістів та кривою сушіння, а також час у точки перетину, як вказано на рис. 4.

Заповнити таблицю 3 даних для визначення швидкості сушіння.

5.3. За даними табл. 3. побудувати графік швидкості сушіння у відповідних координатах. За цим графіком встановити періоди сушіння та визначити гігроскопічний вологовміст матеріалу й розрахувати коефіцієнт швидкості сушіння.

Таблиця 3

Дані для визначення швидкості сушіння

Вологовміст матеріалу		$\Delta \tau_{\Pi}$	$\Delta \omega^C = \omega_{\Pi}^C - \omega_K^C$	Швидкість сушіння $v = \Delta \omega^C / \Delta \tau_{\Pi}$
ω_{Π}^C	ω_K^C			

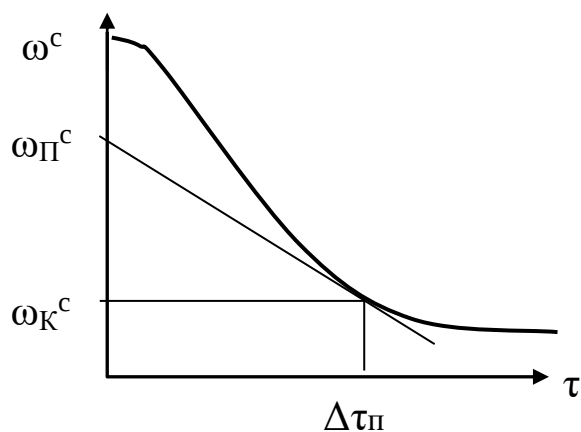


Рис. 4. Графічне визначення швидкості сушіння

6. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Назва лабораторної роботи.
2. Мета роботи.
3. Схема та опис установки.
4. Таблиці даних та графіки сушіння.
5. Розрахунок коефіцієнта сушіння.
6. Висновки.

7. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дайте поняття терміну “сушіння”.
2. Що таке конвективне сушіння?
3. Що таке вологовміст матеріалу?
4. Що таке гігроскопічний вологовміст?
5. Що таке рівноважний вологовміст матеріалу?
6. Що таке температура мокрого термометра?
7. Що таке сушильний агент?
8. Що таке вільна волога?
9. Що таке зв’язана волога?
10. Що таке швидкість сушіння?
11. Як змінюється швидкість сушіння в першому періоді сушіння?
12. Як змінюється швидкість сушіння в другому періоді сушіння?
13. Як змінюється температура матеріалу в першому періоді сушіння?
14. Як змінюється температура матеріалу в другому періоді сушіння?
15. Яка волога видаляється з матеріалу в першому періоді сушіння?
16. Яка волога видаляється з матеріалу в другому періоді сушіння?

8. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник — Х.: Світ Книг, 2019. — 496 с.
2. Методичні вказівки до лабораторної роботи № 9 «Дослідження процесу сушіння матеріалів в конвективній сушарці» з дисципліни «Процеси та апарати харчових виробництв» за освітнім рівнем «Бакалавр» для студентів спеціальності «181- Харчові технології»/ Укл.: Ляшенко А.О., Скнар Ю.Є., Рябік П.В., Гриднева Т.В. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2021. – 12 с.
3. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / За ред. проф. І. Ф. Малєжика.— К.: НУХТ, 2003.— 400 с.
4. Конспект лекцій за курсом “Процеси та апарати хімічної технології”, розділ “Сушіння” для студентів III – V курсів усіх спеціальностей / Укл.: А.К. Бучинський, Д.О. Сенін, П.Г. Сорока. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 1994. – 31 с.
5. Бучинський А.К., Коваленко В.С. “Основи технології та техніки сушіння. Навчальний посібник. – Дніпропетровськ, УДХТУ, 2002. – 131 с.
6. Дубова Г.Є., Безусов А.Т. Процеси і апарати харчових виробництв: Навчально-методичний посібник. — Полтава: РВВ ПУСКУ, 2008. — 185 с.