

## Теплообмін під час сушіння бурякового жому перегрітою парою

**В.В. Шутюк**, доктор технічних наук, доцент кафедри технології консервування,

Національний університет харчових технологій

**Т.П. Василенко**, асистент кафедри менеджменту та адміністрування,

Національний університет харчових технологій

**С.А. Бут**, кандидат технічних наук, кафедра технології консервування,

Національний університет харчових технологій

В статті наведено результати експериментального дослідження сушіння жому цукрових буряків перегрітою парою. В результаті досліджень встановлено, що основний вплив температури сушильного агента на швидкість сушіння спостерігається в період сталої швидкості сушіння. Водночас період спадної швидкості сушіння жому неоднорідний, що зумовлено видаленням з матеріалу вологи з різними видами енергії зв'язку. В рамках аналізу розмірностей отриманих результатів розроблено комплексний параметр спільного тепломасообміну – відносний об'ємний коефіцієнт теплопередачі.

**Ключові слова:** сушіння, жом цукрових буряків, аналіз, перегріта пара, коефіцієнт теплопередачі

В статті приведені результати експериментального дослідження сушки жома сахарної свеклы перегретым паром. В результате исследования установлено, что основное влияние температуры сушильного агента на скорость сушки наблюдается в период постоянной скорости сушки. В то же время период убывающей скорости сушки жома неоднороден, что обусловлено удалением из материала влаги с различными видами энергии связи. В рамках анализа размерностей полученных результатов разработан комплексный параметр общего тепломассообмена – относительный объемный коэффициент теплопередачи.

**Ключевые слова:** сушка, жом сахарной свеклы, анализ, перегретый пар, коэффициент теплопередачи

The article contains the results of experimental research on sugar beet pulp drying with superheated steam. The research allowed us to conclude that the major influence of temperature of drying agent on the drying rate is observed at the stage of sustained drying rate. At the same time the stage of receding pulp drying rate is heterogeneous, which is caused by extracting of moisture from the materials with different kinds of binding force. In the course of analysis of the received values we have calculated the complex parameter of the general heat and mass exchange, i.e. the relative volumetric heat transfer coefficient.

**Key words:** drying, sugar beet pulp, analysis, superheated steam, heat-transfer coefficient.

У більшості розвинених країн світу від 7 до 15% споживаної промисловістю енергії використовується на сушіння, тому, з огляду на значне споживання енергії в процесі зневоднення харчових продуктів, проблема впровадження енергоощадних технологій сушіння є пріоритетною у вітчизняній харчовій промисловості. Одним із шляхів вирішення даного питання є перехід від конвективного сушіння жому цукрових буряків до сушіння перегрітою парою. Так, для зневоднення пресованого жому цукрового буряку [2, 4] в умовній високотемпературній сушарці на випаровування вологи необхідно витратити теплової енергії майже 5000 кДж/кг, тим часом як німецька високонапірна парова сушарка ВМА АG споживає 2900 кДж/кг.

Результати експериментальних досліджень кінетики сушіння жому цукрових буряків показують, що вологовміст інтенсивніше змінюється у разі сушіння перегрітою парою, ніж гарячим повітрям за однакових температур [1]. Водночас, кінетика сушіння перегрітою парою залежить від тем-

ператури і швидкості пари. Збільшення температури та швидкості пари призводить до зменшення тривалості сушіння [3].

Адаптація сушарок до умов сушіння перегрітою парою вимагає непростой реалізації додаткових умов, тому виготовляють парові сушарки менше десяти високотехнологічних підприємств у світі. Перевага сушіння перегрітою парою окрім низького споживання енергії ще й в наступному: відсутність реакцій окиснення та згорання, безпечність вибуху та, як правило, вища якість продукту [5].

**Мета досліджень** – проаналізувати процеси перенесення під час сушіння жому цукрових буряків перегрітою парою та розробити методики визначення впливу характеристик процесу зневоднення на його інтенсивність.

**Матеріали і методи.** Для дослідження як продукт використовували свіжий жом цукрових буряків у вигляді екстрагованої січки від 50 мкм до 1 мм з вологовмістом 76...80 %. Сухі речовини містили, %: геміцелюлозу - 25...33; целюлозу -

20...27; лігнін - 1...6; уронові кислоти - 21,5...23; білок - 7...12; залишкову сахарозу - до 0,5; золу - 4. Зразки жому заморожували ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) для зберігання і розморожували до кімнатної температури перед кожним експериментом сушіння.

Зразки жому брали з ПАТ «Кагарлицький цукровий завод» та ВАТ «КРИСТАЛ-М» з початковим вологовмістом 5,25 кг/кг. Дослідні партії жому відбирали безпосередньо після жомових пресів перед їх подачею в жомосушильні барабани або жомові ями. Розміри дослідних партій становили 20...25 кг кожного виду. Зразки сортували і розфасовували в окремі місткості. При цьому хімічні методи оброблення не використовували. Жом сушили в умовах лабораторії до кінцевого вологовмісту 10...13 %.

Для дослідження кінетики сушіння колоїдних капілярно пористих тіл використовували експериментальну установку кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, яка має широкий діапазон регулювання температури сушіння і швидкості руху перегрітої пари.

**Результати досліджень.** Дослідження кінетики сушіння процесу бурякового жому проводили за таких змінних параметрів: тиск пари 0,12 МПа; температура перегрітої пари на вході в робочу камеру 120...180  $^{\circ}\text{C}$ ; швидкість перегрітої пари в робочій камері 1...3 м/с; початкова вологість жому 5,25 кг/кг.

В усіх дослідженнях значення вихідних параметрів підтримувалися постійними. Аналіз отриманих даних зневоднення бурякового жому (рис. 1) показує, що на інтенсивність сушіння найбільше впливає температура перегрітої пари. Так, при швидкості 1 м/с підвищення температури сушильного агента на 60  $^{\circ}\text{C}$  із 120 до 180  $^{\circ}\text{C}$  призводить до збільшення швидкості сушіння у 2,3 рази, відповідно час сушіння скорочується з

540 до 240 с (рис. 1, а). На швидкість зневоднення менше впливає зміна швидкості сушильного агента (рис. 1). Так, зі збільшенням швидкості з 1 до 3 м/с (за температури перегрітої пари 140  $^{\circ}\text{C}$ ) швидкість сушіння зростає на 40 %, відповідно час сушіння скорочується з 420 до 300 с.

Прогрівання матеріалу в середовищі перегрітої пари відбувається значно швидше, ніж у середовищі повітря. Проте у початковий період сушіння (упродовж перших 30 с) значення швидкості зневоднення майже не змінюється (див. рис. 1). Вплив окремих режимних параметрів на інтенсивність сушіння в початковому періоді у цілому не змінюється. Як видно з графіків, матеріал прогрівається швидко - за кілька хвилин. Це зумовлено тим, що сушиться продукт з малим розміром частинок і високою інтенсивністю теплообміну.

Кінетичні криві, за визначенням, характеризують процес зневоднення безвідносно до інтенсивності його перебігу та процесів перенесення, які під час цього відбуваються. Тому проаналізовано процеси перенесення під час зневоднення жому цукрових буряків з метою розроблення методики визначення впливу характеристик процесу зневоднення на його інтенсивність.

За визначальний параметр вибрали об'ємний аналог коефіцієнта теплопередачі, який входить до рівняння теплопередачі з визначення густини теплового потоку - «об'ємний коефіцієнт теплопередачі», як коефіцієнт пропорційності, що характеризує кількість теплоти, витраченої на випарування вологи з 1 м<sup>3</sup> за одиницю часу при різниці температур між теплоносіями 1  $^{\circ}\text{C}$ . Вибір пояснюється тим, що для вільно насипаного бурякового жому, без механічного пресування, за незначної висоти насипного шару (до 8 см), який забезпечує кращий обдув матеріалу, але не припускає утворення звшеного шару, не можна з відповідною

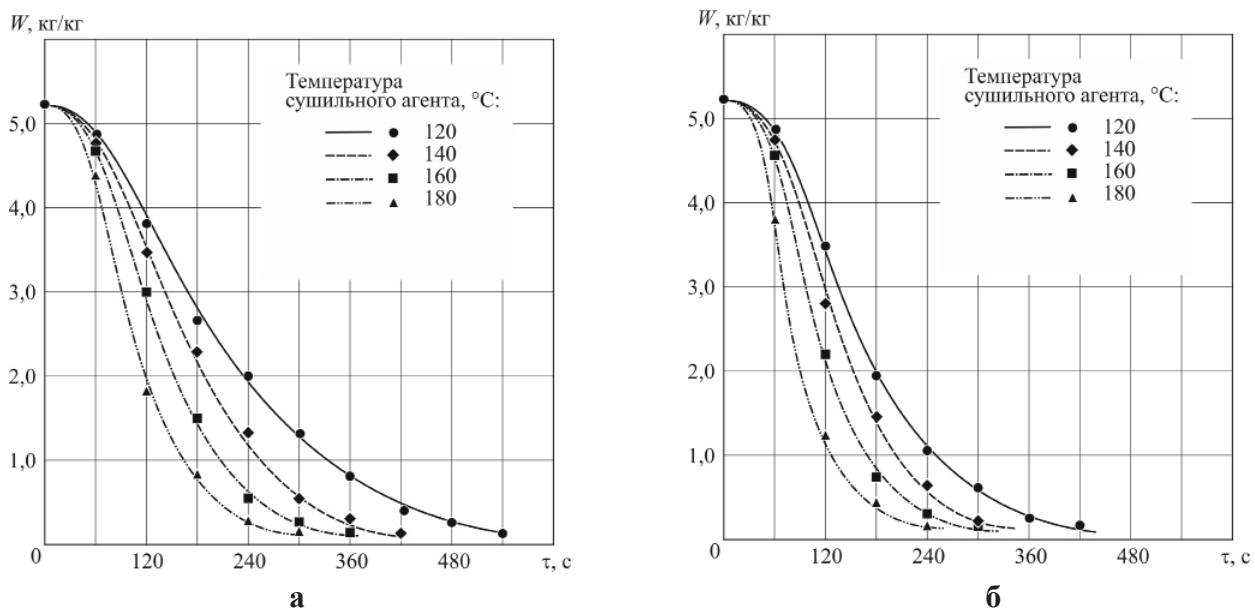


Рис. 1. Графіки залежності зневоднення бурякового жому перегрітою парою за різних температур і швидкості: а - 1 м/с; б - 3 м/с

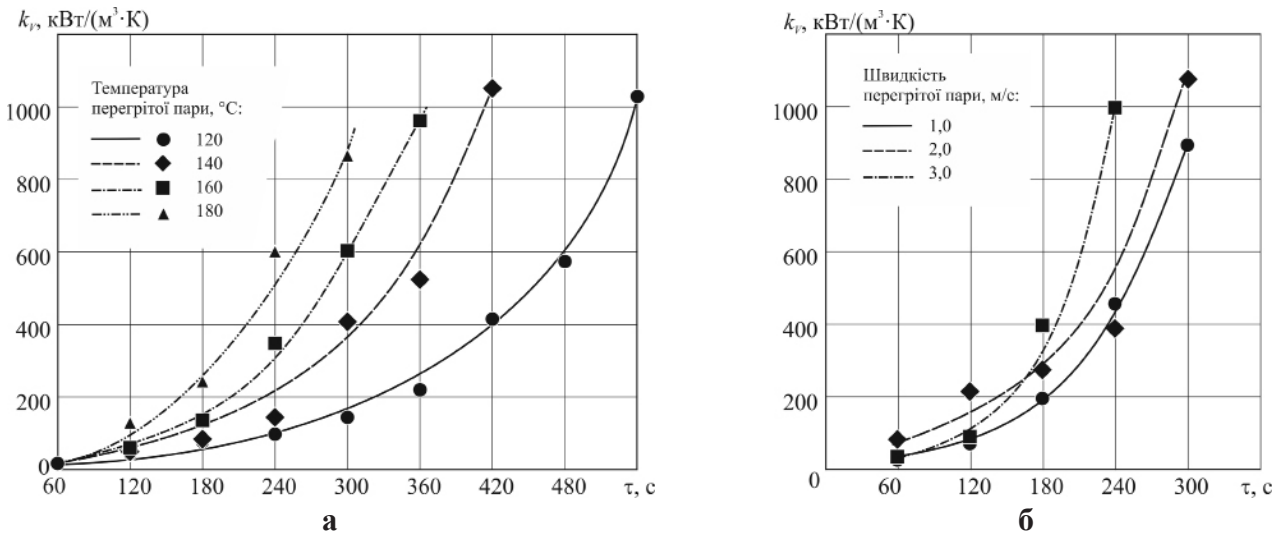


Рис. 2. Залежність зміни об'ємного коефіцієнта теплопередачі від тривалості сушіння перегрітою парою за початкового вологовмісту  $W = 5,25$  кг/кг: а - швидкості 1 м/с; б - температури 140 °С

точністю визначити активну поверхню всіх частинок бурякового жому, які беруть участь у процесі сушіння.

У разі низькотемпературного сушіння зразка об'ємний коефіцієнт теплопередачі розраховували так:

$$k_v = \frac{\Delta W r}{\tau(t_{ca} - t_{ж\text{ср}})V_{ж}} \quad (1)$$

де  $\Delta W$  - кількість видаленої вологи за час сушіння, кг;  $r$  - теплота пароутворення, кДж/кг;  $\tau$  - час сушіння, с;  $t_{ca}$  - температура сушильного агента, °С;  $t_{ж\text{ср}}$  - середня температура зразка під час сушіння, °С;  $V_{ж}$  - об'єм зразка, м<sup>3</sup>.

Результати аналізу дослідних даних для сушіння жому перегрітою парою також мають подобу до процесу сушіння гарячим повітрям – побудова залежностей у вигляді  $k_v = f(\tau)$  показує що збільшення температури перегрітої пари з 120 до 180 °С приводить до зменшення часу сушіння та одному

характері зміни об'ємного коефіцієнта теплопередачі (рис. 3, а, б). Приклад отриманих кривих для швидкості перегрітої 1 м/с та діапазону температур від 120 до 180 °С наведено рис. 2, а. Відповідно зміна швидкості руху перегрітої пари має незначний вплив на зміну значення  $k_v$  (рис. 2, б).

Аналіз кривих зміни об'ємного коефіцієнта теплопередачі від вологовмісту жому показує, що сушіння перегрітою парою в діапазоні температур 120...180 °С, як і гарячим повітрям, практично не залежить від температури сушильного агента. На відміну від сушіння гарячим повітрям незначна розбіжність значень спостерігається й у разі зміни швидкості перегрітої пари в діапазоні 1...3 м/с. Це можна пояснити незначною зміною швидкості такого сушильного агента, як перегріта пара.

Тому криві, отримані для різних режимів сушіння перегрітою парою, мають загальний характер функціональної залежності  $k_v = f(W)$  і апроксимовані рівнянням виду:

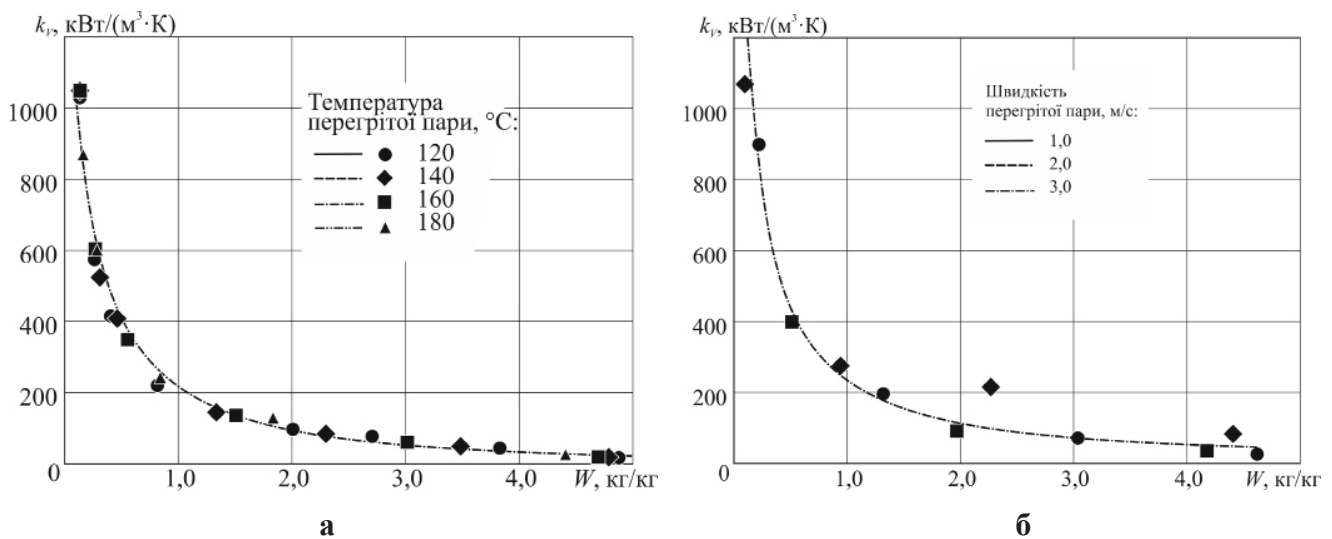


Рис. 3. Залежність зміни коефіцієнта об'ємної теплопередачі бурякового жому від вологовмісту жому за початкового вологовмісту  $W = 5,25$  кг/кг у процесі сушіння перегрітою парою: а - швидкість 1 м/с; б - температура 140 °С

$$k_v = C_1 e^{C_2 W}. \quad (2)$$

Розрахунок проводився за допомогою програмних пакетів Statistica 10 і Microsoft Excel 2010.

Розрахункову залежність зміни об'ємного коефіцієнта теплопередачі у процесі сушіння жому перегрітою парою знаходили за допомогою програмних пакетів Statistica 10 і Microsoft Excel 2010. Для діапазону температур перегрітої пари 120...180 °С та швидкості сушильного агента 1...3 м/с вона має вигляд

$$k_v = 848,35 e^{-1,22W}. \quad (3)$$

### Висновки

Під час сушіння жому перегрітою парою основний вплив температури сушильного агента на швидкість сушіння спостерігається в період сталої швидкості сушіння. Водночас період спадної швидкості сушіння жому неоднорідний - на кривих швидкості сушіння спостерігається кілька точок перегину, що зумовлено видаленням з матеріалу вологи з різними видами енергії зв'язку.

Аналіз результатів експериментального дослідження в рамках аналізу розмірностей дозволив розробити комплексний параметр спільного тепломасообміну – відносний об'ємний коефіцієнт

теплопередачі під час сушіння жому цукрових буряків перегрітою парою. ■

### Список використаних джерел

1. Шутюк В.В. Визначення основних параметрів перегрітої пари при сушінні харчових продуктів / В.В. Шутюк, С.М. Василенко, О.С. Бессараб // Наукові праці. – Одеса: ОНАХТ, 2014. – Т.2, Вип. 45. – С. 172–177.

2. Шутюк В.В. Порівняльний аналіз сушіння жому цукрових буряків гарячим повітрям і перегрітою парою / В.В. Шутюк, С.М. Василенко, О.С. Бессараб // Наукові праці. – Одеса: ОНАХТ, 2014. – Т.1, Вип. 45. – С. 96–100.

3. Pronyk C. Current status of superheated steam drying and processing / C. Pronyk, S. Cenkowski, W.E. Muir // Proceedings of the 3rd Inter-American Drying. – 2005. – № 7. – P. 127–129.

4. Schroder D. Einige Gedanken zum Einsatz einer Niedertemperatur – Trocknung innerhalb der Schnitzeltrocknung / D. Schroder // Zuckertindustrie. – 1983. – № 2. – P. 126-135.

5. Tang Z. Dehydration dynamics of potatoes in superheated steam and hot air / Z. Tang, S. Cenkowski // Canadian Agricultural Engineering. – 2000. – № 42 (1). – P. 43–49.

### ЦІКАВІ ФАКТИ

#### Смачні факти про шоколад

З шоколадом пов'язано багато цікавих фактів та історій. Пропонуємо дізнатися про це лакомство дещо нове.

1. Перший формат шоколаду, який повною мірою підходив для широкого вжитку, був розроблений на шоколадній фабриці Фрай, розташованій в Брістолі (Англія) в 1847 році.

2. У Бельгії 17 тисяч людей зайняті у виробництві шоколаду.

3. Один маленький шматочок шоколаду може дати людині достатньо енергії, щоб пройти 45,5 метрів.

4. Фахівці армії США спільно з компанією Hershey поліпшили термостійкі якості сучасного шоколаду, зробивши його здатним витримувати спекотне сонце під час операції «Буря в пустелі». Спеціально розроблені шоколадні батончики зберігають твердість при температурі до 60 °С.

5. Шоколад містить фенілетиламін, природну амінокислоту, яка, як вважають вчені, володіє ефектом афродизіака і навіть, кажуть, здатна лікувати похмілля.

6. Шоколад був включений в пайок солдатів Другої світової війни. Згідно з розпорядженням воєначальників, смак цього продукту повинен був характеризуватися як «трохи ліпший, ніж варена картопля», щоб не допустити його стрімкого поїдання.

7. Перша машина для виробництва шоколаду була зроблена в Барселоні (Іспанія) в 1780 році.

8. Кот-д'Івуар є на сьогодні провідним світовим виробником какао-бобів. Близько 37% цього продукту весь світ одержує звідти.

9. Свідчення про існування какао-бобів на планеті дають зрозуміти, що цей продукт є, ймовірно, одним з найдавніших видів їжі на Землі.

10. У 2012 році Швейцарія була визнана країною з найвищим споживанням шоколаду на душу населення. Кожен швейцарець з'їдає за рік близько 12 кг цього продукту.

11. Технічно, білий шоколад не можна назвати шоколадом, оскільки він не містить речовин какао.

12. Найдорожча шоколадна плитка в світі – взята в першу подорож до Антарктиди капітаном Робертом Скоттом плитка Cadbury. Зараз її вік становить понад 100 років, і вона досі залишилася недоторканою. У 2001 році плитка була куплена за 687 доларів на аукціоні Крістіс анонімним покупцем.