

УДК 664.126:66.047

## ANALYSIS OF HEAT TRANSFER DURING THE PULP DRYING PROCESS WITH SUPERHEATED STEAM

V. Shutyuk, S. Vasylenko, S. But

National University of Food Technologies

---

**Key words:**

*Drying  
Sugar beet pulp  
Analysis  
Superheated steam  
Heat-transfer coefficient*

**Article history:**

Received 13.03.2017  
Received in revised form  
08.04.2017  
Accepted 22.04.2017

**Corresponding author:**

V. Shutyuk  
E-mail:  
npnuht@ukr.net

---

**ABSTRACT**

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 the 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.

---

## АНАЛІЗ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ПІД ЧАС СУШІННЯ БУРЯКОВОГО ЖОМУ ПЕРЕГРІТОЮ ПАРОЮ

В.В. Шутюк, С.М. Василенко, С.А. Бут

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.

**Постановка проблеми.** 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. До більш інтенсивних досліджень заощадження потенційної енергії в сушильних технологіях спонукає також постійне зростання вартості енергоресурсів.

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; 6] в умовній високо-температурній сушарці на випаровування вологи необхідно витратити теплової енергії майже 5000 кДж/кг, тоді як німецька високонапірна парова сушарка ВМА AG 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; 4]. Водночас кінетика сушіння перегрітою парою залежить від температури і швидкості пари. Збільшення температури та швидкості пари призводить до зменшення тривалості сушіння [3—5].

Адаптація сушарок до умов сушіння перегрітою парою вимагає непростой реалізації додаткових умов, тому парові сушарки виготовляють менше десяти високотехнологічних підприємств у світі. Перевагою сушіння перегрітою парою, окрім низького споживання енергії, є відсутність реакцій окиснення та згоряння, безпечність вибуху та, як правило, вища якість продукту [7].

**Мета дослідження:** 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 °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 і обговорення.** 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 °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. 1б) показує, що на інтенсивність сушіння найбільше впливає температура перегрітої пари.

Так, підвищення температури сушильного агента на 60 °С із 120 до 180 °С призводить до збільшення швидкості сушіння у 2,4 раза на другій хвилині сушіння — з 0,018 до 0,043 кг/(кг·с). 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 °С) швидкість сушіння зростає на 19 % з 0,033 до 0,039 кг/(кг·с). При цьому максимальна швидкість зневоднення зі збільшенням швидкості перегрітої пари досягається раніше — за швидкості 3 м/с екстремум змінної досягається на 160 °С, а за 1 м/с — на 180 °С.

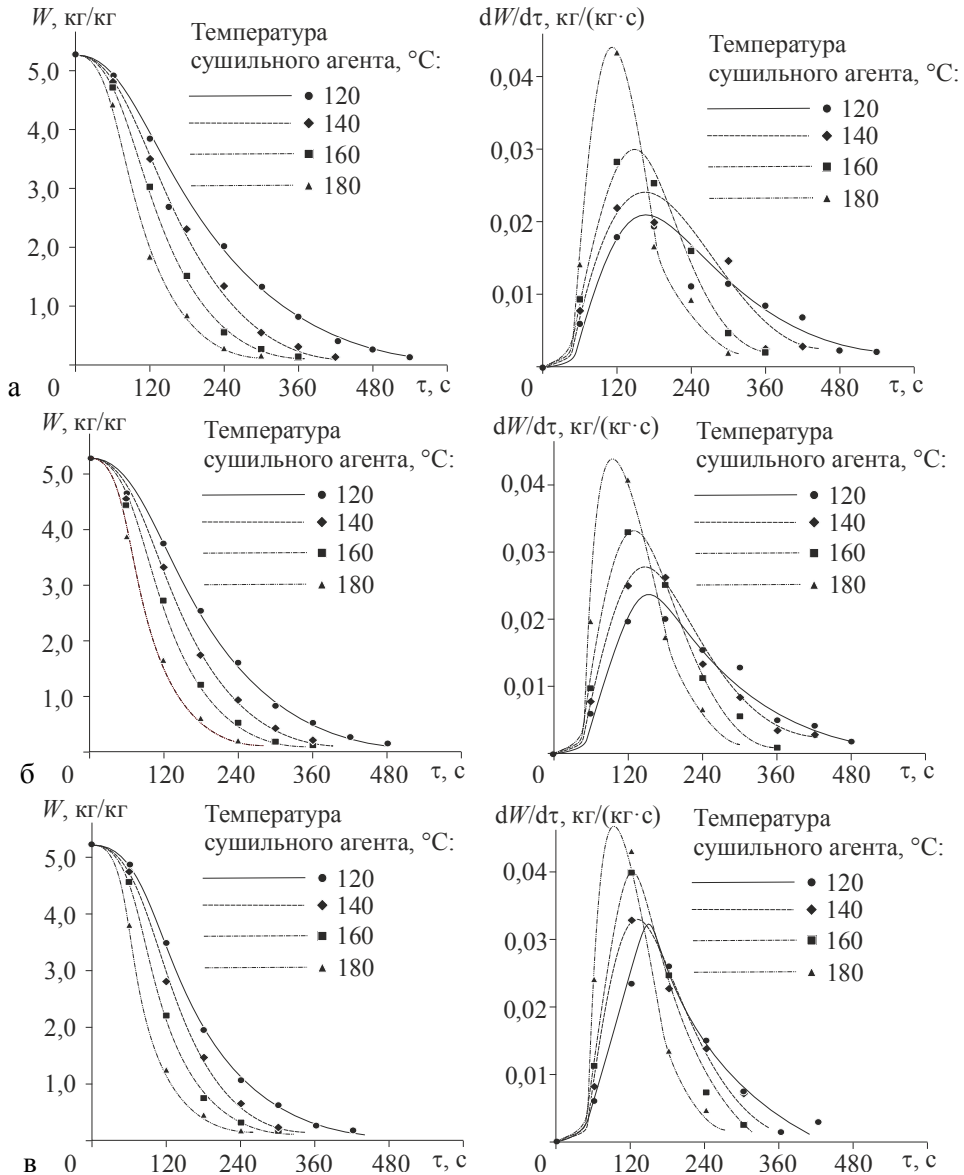


Рис. 1. Графіки залежності зневоднення бурякового жому перегрітою парою за різних температур і швидкості: а — 1 м/с; б — 2 м/с; в — 3 м/с

Як видно з рис. 1, 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. Ця тенденція характерна для кривих сушіння за швидкості перегрітої пари 1 м/с для більшості температур сушильного агента. Зі збільшенням швидкості перегрітої пари спостерігається тільки одна точка перегину (рис. 2).

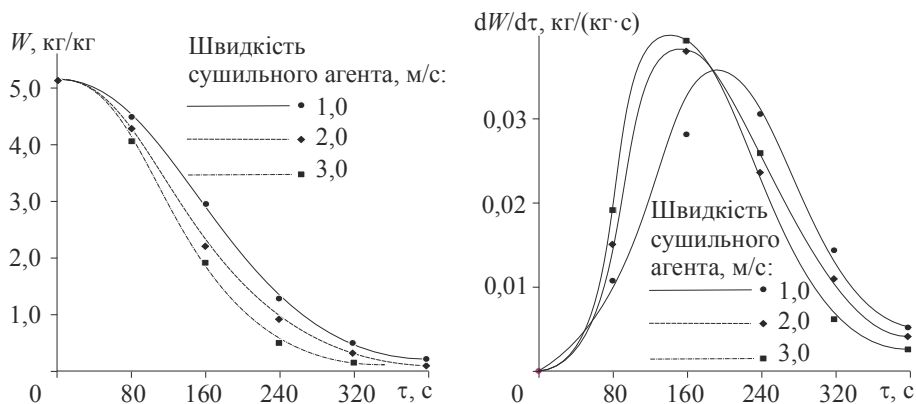


Рис. 2. Графіки залежності зневоднення бурякового жому перегрітою парою за різних швидкостей сушильного агента (температура 140 °С)

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 (рис. 2). Вплив окремих режимних параметрів на інтенсивність сушіння в початковому періоді у цілому не змінюється. Як видно з графіків (рис. 1, 2), 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 випаровування вологи з 1 м<sup>3</sup> за одиницю часу при різниці температур між теплоносіями 1 °С. 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 зв'язаного шару, не можна з відповідною 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 води за час сушіння, кг;  $r$  — теплота пароутворення, кДж/кг;  $\tau$  — час сушіння, с;  $t_{ca}$  — температура сушильного агента, °C;  $t_{ж\text{ср}}$  — середня температура зразка під час сушіння, C;  $V_{ж}$  — об'єм зразка, м<sup>3</sup>.

Результати сушіння жому перегрітою парою схожі із результатами сушіння гарячим повітрям — побудова залежностей у вигляді  $k_V = f(\tau)_T$  показує, що збільшення температури перегрітої пари з 120 до 180 °C призводить до зменшення часу сушіння та одному характері зміни об'ємного коефіцієнта теплопередачі (рис. 5 а, б). Приклад отриманих кривих для швидкості перегрітої 1 м/с та діапазону температур від 120 до 180 °C наведено рис. 3. Відповідно, зміна швидкості руху перегрітої пари має незначний вплив на зміну значення  $k_V$  (рис. 4).

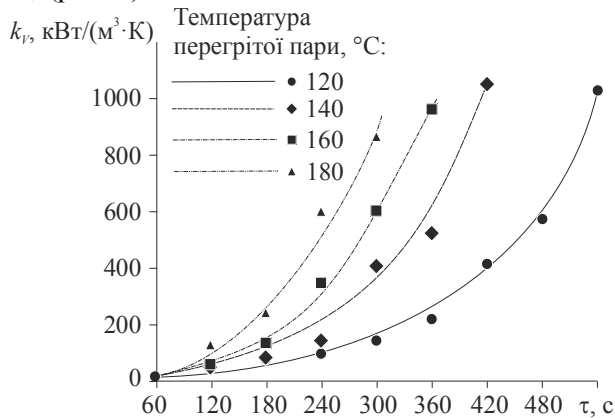


Рис. 3. Залежність зміни об'ємного коефіцієнта теплопередачі від тривалості сушіння за початкового вологовмісту  $W = 5,25$  кг/кг і швидкості перегрітої пари 1 м/с

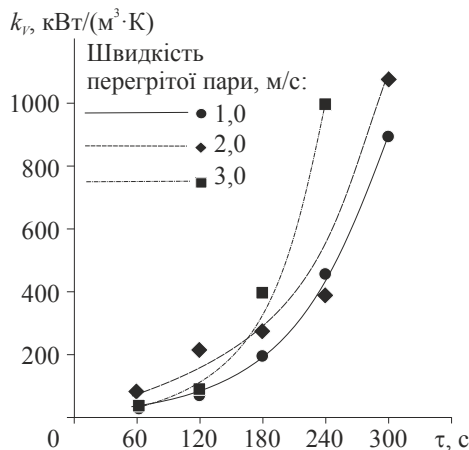


Рис. 4. Залежність зміни об'ємного коефіцієнта теплопередачі бурякового жому від тривалості сушіння за початкового вологовмісту  $W = 5,25$  кг/кг і температури перегрітої пари 140 °C

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.

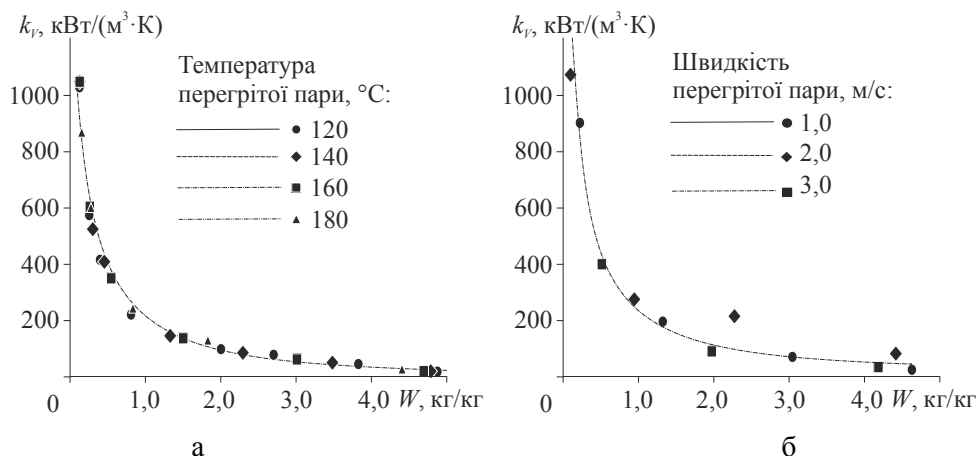


Рис. 5. Залежність зміни коефіцієнта об'ємної тепловіддачі бурякового жому від вологовмісту жому за початкового вологовмісту  $W = 5,25 \text{ кг}/\text{кг}$  у процесі сушіння перегрітою парою: а — швидкість 1 м/с; б — температура 140 °С

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

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

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:

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

## 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 дав змогу розробити комплексний параметр спільного тепло-масообміну — відносний об'ємний коефіцієнт теплопередачі під час сушіння жому цукрових буряків перегрітою парою.

### Література

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. Pronyk C. Drying Foodstuffs with Superheated Steam / C. Pronyk, S. Cenkowski, W. Muir // Drying Technology. — 2004. — № 22. — P. 899—916.
5. Pronyk C. Effects of Superheated Steam Processing on the Textural and Physical Properties of Asian Noodles / C. Pronyk, S.Cenkowski, W. Muir, O. Lukow // Drying Technology. — 2008. — № 26. — P. 192—203.
6. Schroder D. Einige Gedanken zum Einsatz einer Niedertemperatur — Trocknung innerhalb der Schnitzeltrocknung / D. Schroder // Zuckertindustrie. — 1983. — № 2. — P. 126—135.
7. 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.

## АНАЛИЗ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВО ВРЕМЯ СУШКИ СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА ПЕРЕГРЕТЫМ ПАРОМ

В.В. Шутюк, С.М. Василенко, С.А. Бут

Национальный университет пищевых технологий

*В статье приведены результаты экспериментального исследования сушки жома сахарной свеклы перегретым паром. В результате исследований 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 полученных результатов разработан комплексный параметр общего теплообмена — относительный объемный коэффициент теплопередачи.*

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