

ТЕПЛООБМІН ПІД ЧАС КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ БУРЯКОВОГО ЖОМУ ГАРЯЧИМ ПОВІТРЯМ І ПЕРЕГРІТОЮ ПАРОЮ

*В.В. Шутюк, д.т.н., доцент,
С.М. Василенко, д.т.н., професор,
Національний університет харчових технологій
Ю.О. Дашковський, к.т.н./, с.н.с.,
Інститут продовольчих ресурсів НААН*

В статті наведено результати експериментального дослідження конвективного сушіння жому цукрових буряків гарячим повітрям і перегрітою парою. В результаті досліджень встановлено, що основний вплив температури перегрітої пари 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, повітря, перегріта пара, коефіцієнт теплопередачі

HEAT EXCHANGE DURING CONVECTIVE DRYING OF SUGAR BEET PULP OT AIR AND SUPERHEATED STEAM

*V. Shutyuk, D.Sc. Technics, Associate Professor,
S. Vasylenko, D.Sc. Technics, Professor,
National University of Food Technologies
Yu. Dashkovskiy, Ph.Sc. Technics, Sen. Res. Fellow,
Institute of food resources of NAAS*

The article provides the results of experimental research on convective drying of sugar beet pulp with hot air and 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, this being 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

ТЕПЛООБМЕН В ХОДЕ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА ГОРЯЧИМ ВОЗДУХОМ И ПЕРЕГРЕТЫМ ПАРОМ

*В.В. Шутюк, д.т.н., доцент,
С.М. Василенко, д.т.н., професор,
Національний університет пищевых технологий
Ю.А. Дашковский, к.т.н., с.н.с.,
Институт продовольственных ресурсов НААН*

В статье приведены результаты экспериментального исследования конвективной сушки жома сахарной свеклы горячим воздухом и перегретым паром. В результате

исследований определено, что основное влияние температуры перегретого пара на скорость сушки наблюдается в период постоянной скорости сушки. В то же время период убывающей скорости сушки жом неоднороден, что обусловлено удалением из материала влаги с различными видами энергии связи. В рамках анализа размерностей полученных результатов разработан комплексный параметр общего теплообмена – относительный объемный коэффициент теплопередачи.

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

Постановка проблеми. Незважаючи на значні ресурси бурякової сировини, використання жому дуже обмежене [1]. Низький рівень технологій переробки, значні енерговитрати при сушінні й низька якість кінцевого продукту – основні стримуючі фактори розвиток виробництва сухого жому.

Детальний аналіз досліджень ринку цукрового виробництва, показав, що виявляє достатню активність і є досить конкурентним ринок «Жом буряковий, багаса, відходи цукрового виробництва тощо» [2]. У 2017 р. потенційні можливості виробництва цукру в Україні становлять 2080 тис. т. Проте комплексного підходу до проблеми утилізації жому на вітчизняних цукрових заводах досі немає.

Аналіз сучасного стану тенденцій розвитку режимів сушіння харчових продуктів, необхідно зазначити, що сучасні експериментальні дослідження спрямовані на застосування низькотемпературних режимів сушіння [3, 4]. Це обумовлено тим, що визначальним у технологічному процесі підготовки високоякісного сухого жому є спосіб його сушіння, що передбачає м'який температурний режим з використанням теплоносія, очищеного від продуктів згоряння палива. Беручи до уваги фізико-хімічні властивості сировини, сушіння жому необхідно проводити в режимах, що виключають підгоряння поверхні стружки.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні основним методом теоретичного дослідження є аналіз багатозначних течій в рамках моделей четвертого класу, оскільки в більшості задач спряженого тепломасоперенесення основний опір перенесенню енергії та маси реалізується в об'ємі висушуваного тіла.

В основу моделей покладено поняття суцільного однорідного середовища, для якого записуються диференціальні рівняння перенесення кількості руху, енергії та маси в частинних похідних. Для замикання моделей та перевірки їх достовірності використовують результати експериментального дослідження.

Turner and Perge [5], визначили основні ознаки систематизації математичних моделей сушіння капілярно-пористих тіл за формальними математичними ознаками: за кількістю незалежних параметрів процесу та за кількістю просторових координат, в межах яких аналізується задача.

Крім просторових координат та часу є чотири параметри, що визначають перебіг процесу сушіння: вологовміст, температура, концентрація газу та його парціальний тиск. В найпростіших однопараметричних моделях аналізується лише поле вологовмісту. Теплообміном при цьому, очевидно, нехтують.

Двопараметрична модель аналізує поля вологовмісту та температури, тобто аналізує задачу спільного тепломасообміну. Ця модель використовується найчастіше, особливо коли вмістом газу в парогазовій суміші можна знехтувати. Моделі цього типу традиційно використовуються під час аналізу сушіння за низьких тисків з нехтуванням зміни температури та під час сушіння перегрітою парою. Також моделі цього типу традиційно використовуються під час аналізу вакуумного сушіння.

Щодо просторової вимірності, то одновимірні моделі використовують при аналізі процесів в капілярно-пористих тілах, в яких поперечні розміри значно переважають поздовжні, що дозволяє умовно вважати поля параметрів процесу одновимірними [2].

Моделі цього типу традиційно застосовуються для попереднього та інженерного наближеного моделювання.

Багатовимірні моделі застосовують для аналізу перебігу процесів в тілах суттєво неправильної форми, а також для випадків, коли анізотропністю коефіцієнтів перенесення не можна знехтувати [6-8]. Слід відзначити роботи Turner and Perre, що зробили значний внесок до багатовимірного багатопараметричного моделювання сушіння деревини. Вони розробили як математичну модель, так і провели перевірку її адекватності [9, 10]. Wang та Chen [11, 12] розробили модель для випадку сушіння яблук в псевдозрідженому шарі. Анг та ін. [13] розробили двовимірну модель сушіння з врахуванням анізотропії матеріалу. Лін [14] на підставі строгого спрощення задачі отримав точні рішення для полів вологості та температури.

Важливим аспектом моделювання сушіння капілярно-пористих тіл є структурні властивості їх твердої матриці, які, в свою чергу, визначаються напружено-деформованим станом матеріалів [15]. Вплив дисперсії розмірів пор враховується на першому етапі задачі осушення, яка формулюється з урахуванням конвективного, дифузійного та капілярного механізмів масоперенесення в порах. Значний вклад в розвиток теорії внесли роботи Я.І. Соколовського та ін., які стосуються визначення напружено-деформованого стану в'язко-пружних капілярно-пористих тіл, зокрема, деревини [16].

У [17] наведені результати експериментальних досліджень реологічних властивостей деревини з урахуванням анізотропії залежно від зміни температури та вологості. Однак, на сьогодні, врахування деформації, викликані напружено-деформованим станом, під час сушіння та відповідних властивостей висушених тіл, на сьогодні не видається можливим.

Результати досліджень. Одним з енергоємних процесів в харчовій промисловості є процес сушіння жому цукрових буряків, комплексні дослідження цього процесу на кафедрі промислової енергетики і холодильної техніки. За визначальний параметр обрано об'ємний аналог коефіцієнта теплопередачі, який входить до рівняння теплопередачі з визначення густини теплового потоку – «об'ємний коефіцієнт теплопередачі», як коефіцієнт пропорційності, що умовно можна визначити як «кількість теплоти, витраченої на випаровування вологості з 1 м³ за одиницю часу при різниці температур між теплоносійми 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 звшеного 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 тепловіддачі розраховували наступним чином:

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

де ΔW — кількість видаленої вологості за час сушіння, кг; r — теплота пароутворення, кДж/кг; τ — час сушіння, с; t_{ca} — температура сушильного агента, °С; $t_{ж\text{cp}}$ — середня температура зразка під час сушіння, С; $V_{ж}$ — об'єм зразка, м³.

Підставляючи отриманий об'ємний коефіцієнт теплопередачі в рівняння конвективного теплообміну, отримаємо значення теплового потоку для розрахунку теплового балансу сушарки:

$$Q = k_V(t_{ca} - t_{ж\text{cp}})V_{ж} \quad (2)$$

Сушіння жому гарячим повітрям

З метою проведення аналізу даних на першому етапі дослідження побудували сімейство кривих залежностей виду $k_V = f(\tau)T$ для лабораторних зразків жому,

висушеного гарячим повітрям. Приклад отриманих кривих для одного з режимів наведено на рис. 1.

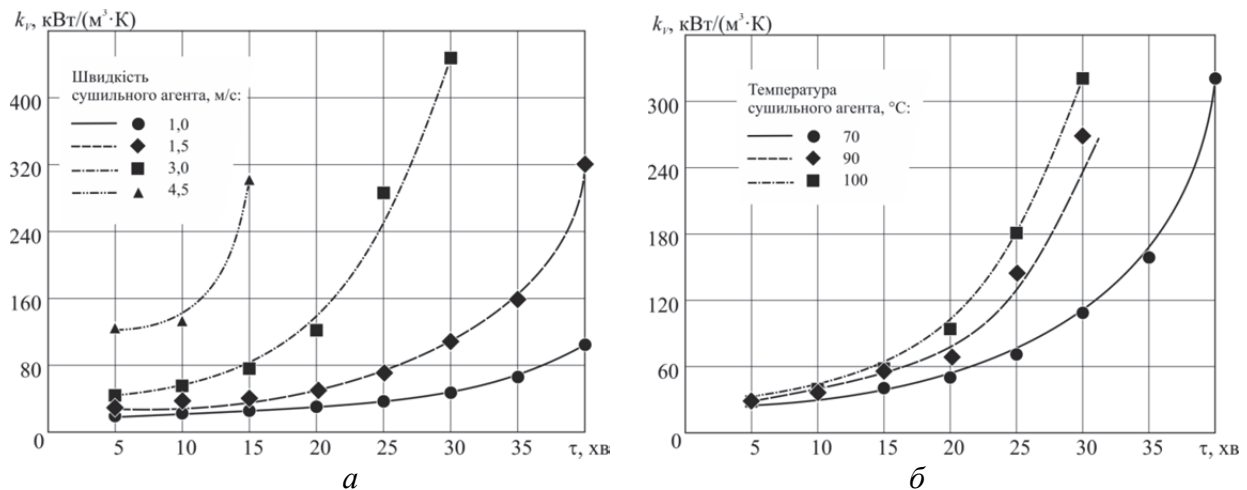


Рис. 1. Залежність зміни об'ємного коефіцієнта теплопередачі від тривалості сушіння за початкового вологовмісту $W = 5,25$ кг/кг:

***a* – за температури сушильного агента (повітря) 70 °С;**

***б* – швидкості сушильного агента (повітря) 2 м/с**

З рис. 1 видно, що існує чітка залежність отриманого коефіцієнта від параметрів процесу, і що зі збільшенням періоду сушіння коефіцієнт об'ємної тепловіддачі збільшується. Спочатку зміни відбуваються плавно, наближено до лінійної закономірності, потім різко збільшуються для обох випадків — сталої температури і швидкості сушильного агента.

Залежність $k_V = f(\tau)T$ не є інформативною з точки зору характеру процесу теплообміну, а лише характеризує зміну коефіцієнта в часі, тому розраховані залежності сушіння жому з початковим вологовмістом 5,25 кг/кг для різних режимів мають вигляд $k_V = f(W)T$ (рис. 2).

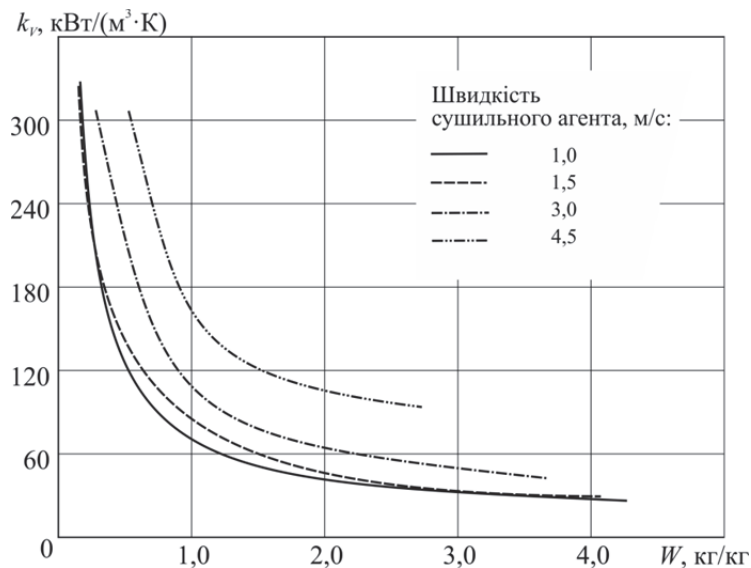


Рис. 2. Залежність зміни коефіцієнта об'ємної тепловіддачі бурякового жому від вологовмісту жому за початкового вологовмісту $W = 5,25$ кг/кг від швидкості сушильного агента

Аналіз кривих зміни об'ємного коефіцієнта теплопередачі бурякового жому від вологовмісту жому показує, що його величина практично не залежить від температури

сушильного агента. На зміну значення k_V більшою мірою впливає швидкість руху сушильного агента (див. рис. 2).

Результати, отримані для різних режимів низькотемпературного сушіння, представлені у вигляді функціональної залежності $k_V = f(W)_v$, були апроксимовані рівняннями виду

$$k_V = C_1 e^{C_2 W + C_3 v} \quad (3)$$

$$k_V = (C_1 + C_3 v) e^{C_2 W} \quad (4)$$

Розрахунок проводився за допомогою програмних пакетів Statistica 10 і Microsoft Excel 2010. Аналіз опрацювання результатів двома пакетами програм для отримання двох залежностей для визначення об'ємного коефіцієнта тепловіддачі у процесі сушіння жому гарячим повітрям показав, що з більшою точністю залежність (4) визначено за допомогою програмного пакета Statistica 10.

Крім того, значення коефіцієнтів C_1 і C_2 відрізняються для реалізації рівняння двома степеневими функціями. Дана залежність для об'ємного коефіцієнта тепловіддачі при сушінні жому гарячим повітрям ($t=120\dots180$ °С, $v=1\dots4,5$ м/с) з початковим вологовмістом 5,25 кг/кг для сушильного агента відповідає залежності (4).

Отримані залежності підтвердили вплив обраних розмірних параметрів на характер досліджуваного процесу, а застосування методу π -теореми дало змогу запропонувати узагальнювальну залежність у вигляді

$$k_V^+ = f(v', W) \quad (5)$$

$$k_V^+ = k_V \frac{\delta_{\text{ж}}^2}{\lambda_{\text{ж}}} \quad (6)$$

де k_V^+ — безрозмірний об'ємний коефіцієнт теплопередачі; v' — безрозмірна швидкість сушильного агента; $v' = v_{\text{ca}}^2 / (g v_{\text{ca}})$; $\delta_{\text{ж}}$ — висота прошарку жому, м; $\lambda_{\text{ж}}$ — коефіцієнт ефективної теплопровідності жому, Вт/(м·К); v_{ca} — швидкість сушильного агента, м/с; v_{ca} — кінематична в'язкість сушильного агента, м²/с.

Кореляція даних у такому вигляді дала можливість отримати розрахункову залежність для визначення безрозмірної форми об'ємного коефіцієнта тепловіддачі:

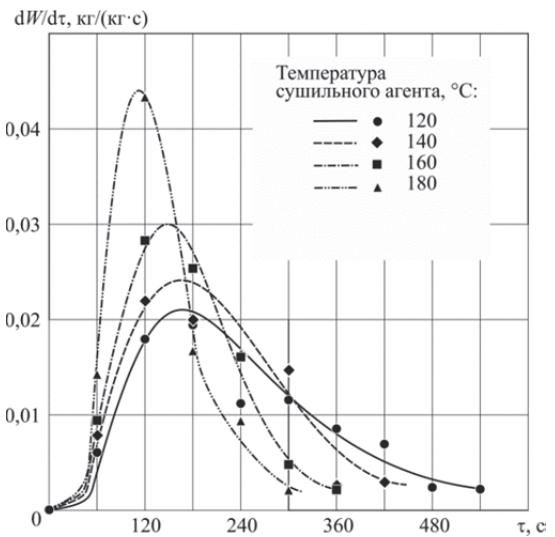
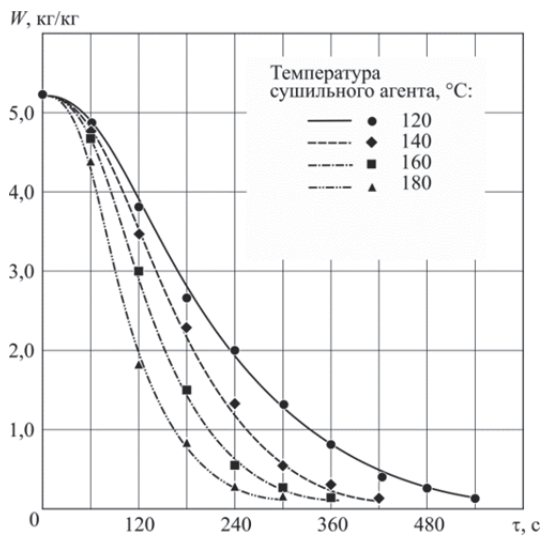
$$k_V^+ = (C_1 + C_3 v') e^{C_2 W} \quad (8)$$

де $C_1 = 235,54$; $C_2 = -0,835$; $C_3 = 5,3 \cdot 10^{-4}$; $R^2 = 0,92$.

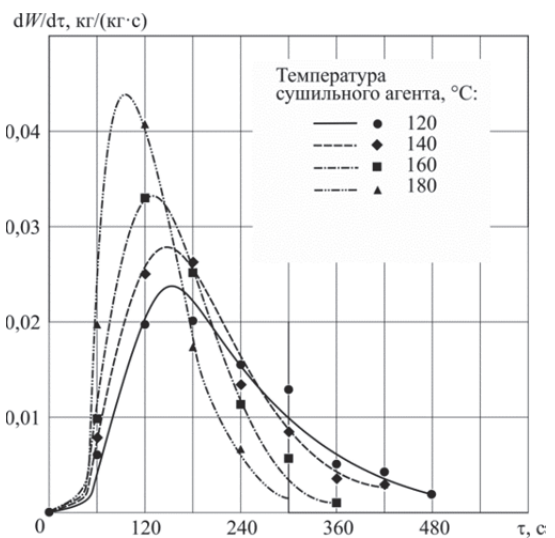
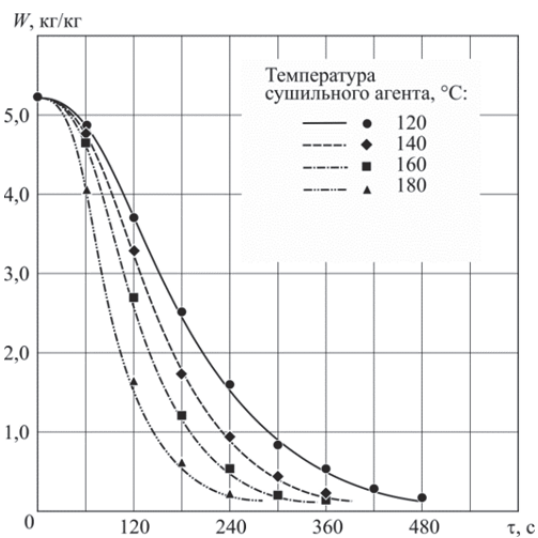
Сушіння жому перегрітою парою. Дослідження кінетики сушіння процесу бурякового жому перегрітою парою проводили за таких змінних параметрів:

- тиск пари 0,12 МПа;
- температура перегрітої пари на вході в робочу камеру 120...180 °С;
- швидкість перегрітої пари в робочій камері 1...3 м/с;
- початкова вологість жому 5,25 кг/кг.

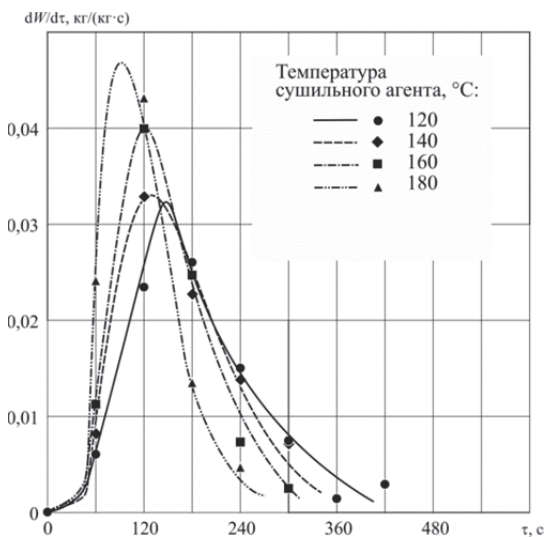
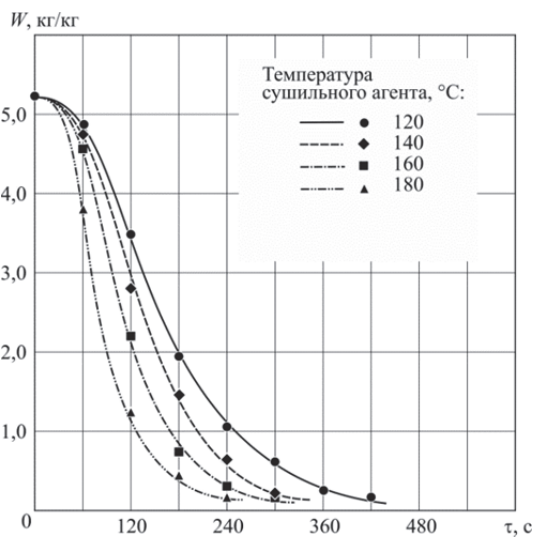
В усіх дослідженнях значення вихідних параметрів підтримувалися постійними. Аналіз отриманих даних зневоднення бурякового жому (рис. 1, б) показує, що на інтенсивність сушіння найбільше впливає температура перегрітої пари. Так, підвищення температури сушильного агента на 60 °С із 120 до 180 °С призводить до збільшення швидкості сушіння у 2,4 рази 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.



a



б



в

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

Як видно з рис. 3, 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. 4).

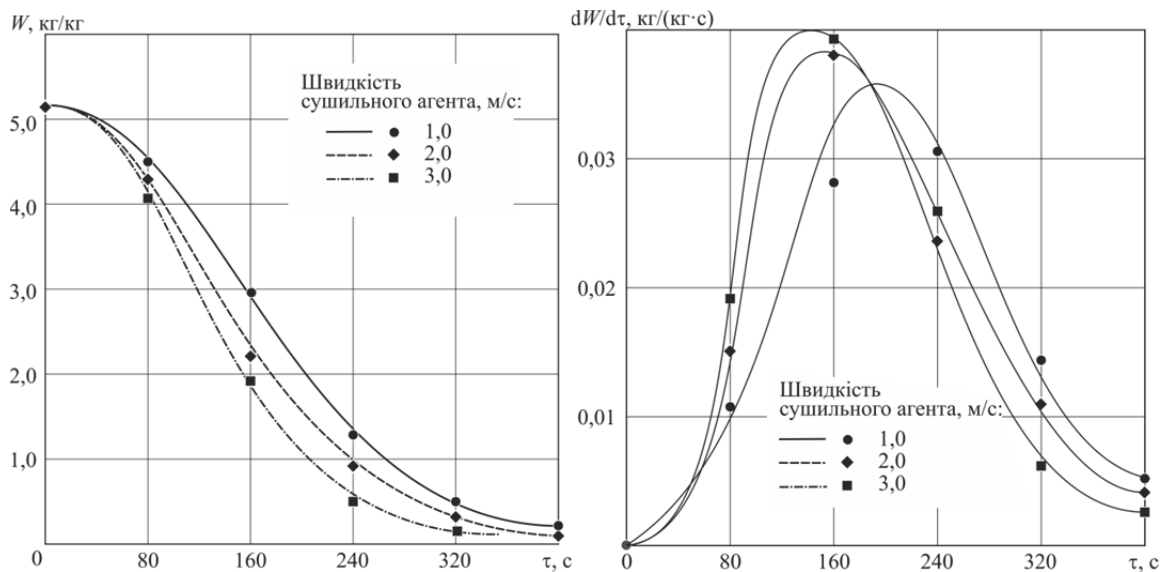


Рис. 4. Графіки залежності зневоднення бурякового жому перегрітою парою за різних швидкостей сушильного агента (температура 140 °С)

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 (див. рис. 4). Вплив окремих режимних параметрів на інтенсивність сушіння в початковому періоді, у цілому, не змінюється. Як видно з графіків (див. рис. 3, 4), матеріал прогрівається швидко — за кілька хвилин. Це зумовлено тим, що сушиться продукт з малим розміром частинок і високою інтенсивністю теплообміну.

Результати аналізу дослідних даних для сушіння жому перегрітою парою також мають подобу до процесу сушіння гарячим повітрям – побудова залежностей у вигляді $k_V = f(\tau)T$ показує, що збільшення температури перегрітої пари з 120 до 180 °С приводить до зменшення часу сушіння та має один характер зміни об’ємного коефіцієнта тепловіддачі (рис. 5, а, б). Приклад отриманих кривих для швидкості перегрітої 1 м/с та діапазону температур від 120 до 180 °С наведено рис. 3. Відповідно зміна швидкості руху перегрітої пари має незначний вплив на зміну значення k_V (рис. 5).

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 (рис. 6.) Це можна пояснити незначною зміною швидкості такого сушильного агента, як перегріта пара.

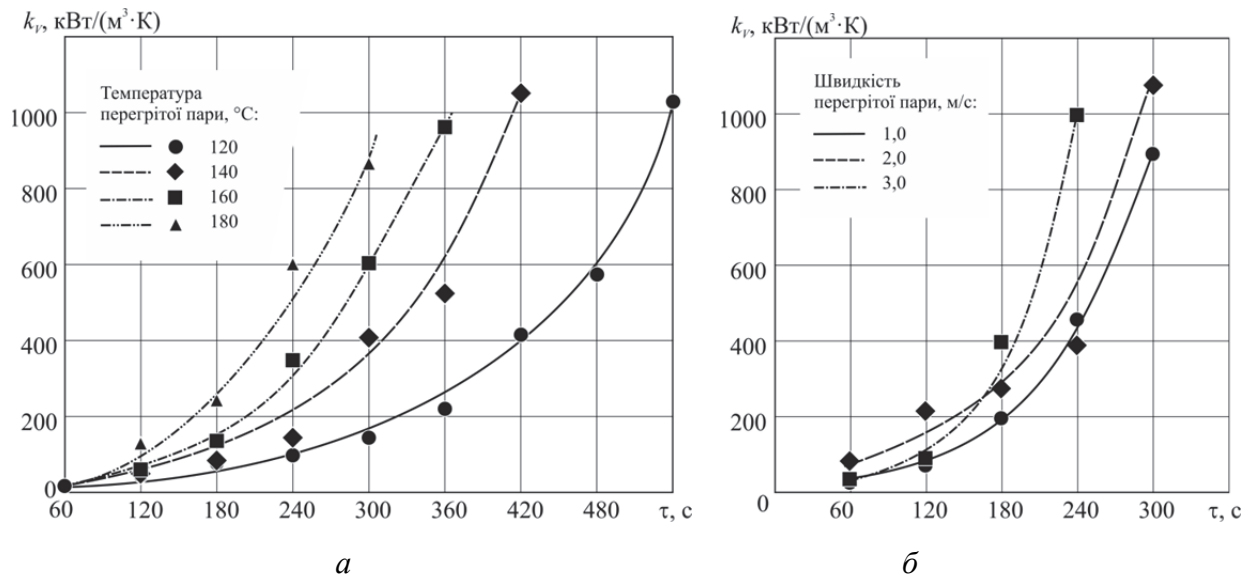


Рис. 5. Залежність зміни об'ємного коефіцієнта теплопередачі від тривалості сушіння за початкового вологовмісту $W = 5,25$ кг/кг:

a – за швидкості перегрітої пари 1 м/с; *б* – за температури перегрітої пари 140 °С

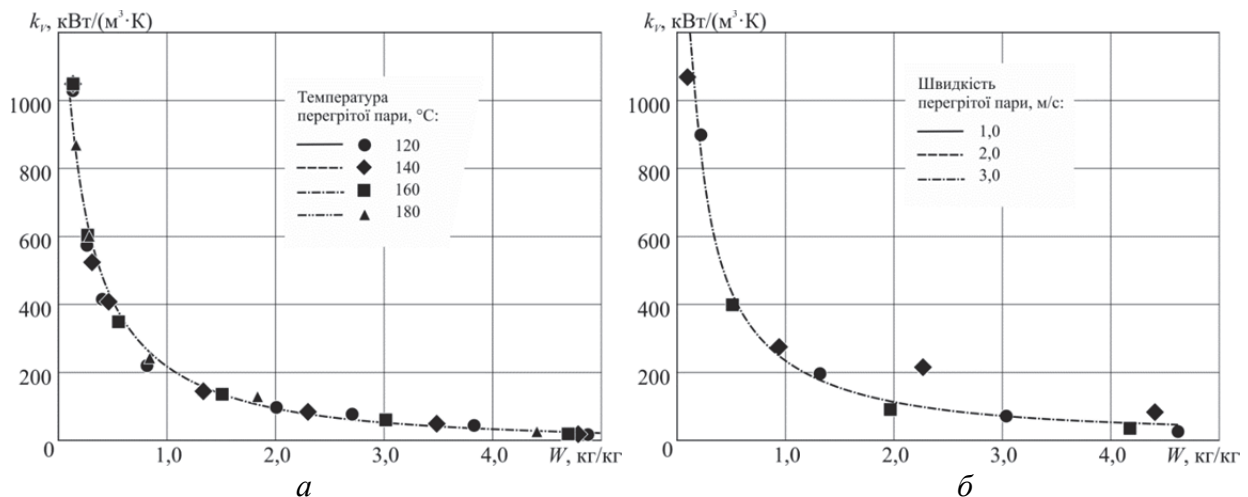


Рис. 6. Залежність зміни коефіцієнта об'ємної тепловіддачі бурякового жому від вологовмісту жому за початкового вологовмісту $W = 5,25$ кг/кг у процесі сушіння перегрітою парою: *a* – швидкість 1 м/с; *б* – температура 140 °С

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

$$k_V = C_1 e^{C_2 W} \quad (9)$$

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

$$k_V = 848,35 e^{-1,22W} \quad (10)$$

де $C_1 = 848,35$; $C_2 = -1,22$.

Висновки

Аналіз результатів експериментального дослідження в рамках аналізу розмірностей дозволив розробити комплексний параметр спільного тепломасообміну – відносний об'ємний коефіцієнт теплопередачі, а також розробити методику розрахунку інтенсивності теплообміну під час сушіння жому цукрових буряків.

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.

Література

1. Бондар В.С. Цукробуряковий підкомплекс України: напрями стабілізації та індикатори розвитку до 2020 року / В.С. Бондар, А.В. Фурса // Економіка АПК. - 2014. - № 1. – С. 20-29.
2. Аналітична доповідь до Щорічного Послання Президента України до Верховної Ради України «Про внутрішнє та зовнішнє становище України в 2016 році». – К. : НІСД, 2016. – 688 с.
3. Наилучшие доступные технологии – методологическая основа инновационной энергоэффективности сахарного производства / Т.П. Василенко, С.М. Василенко, Ж.К. Сиднева, В.В. Шутюк // Ukrainian Food Journal. – 2014. – Vol. 3, Is. 1. – P. 122-133.
4. Devahastin S. Superheated steam drying—special issue of Drying Technology / S. Devahastin // Drying Technol. – 2008. – № 26 (2). – P. 157–230.
5. Turner I.W. Vacuum drying of wood with radiative heating: II. Comparison between theory and experiment / I.W. Turner, P. Perre // AIChE Journal. – 2004. – № 50.– P. 108–118.
6. Kowalski S.J. Drying stress formation by inhomogeneous moisture and temperature distribution / S.J. Kowalski, A. Rybicki // Transport in Porous Media. - 1996. - № 24. - P.139-156.
7. Ni H. Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: A multiphase porous media model / H. Ni, A.K. Datta, K.E. Tottance // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1999. – № 42. – P. 1501–1512.
8. Wei C.K. Heat and mass transfer in water-laden sandstone: Convective heating / C.K. Wei, H.T. Davis, E.A. Davis, J. Gordon // AIChE Journal. – 1985. – № 31. – P. 1338–1348.
9. Turner I.W. The use of implicit flux limiting schemes in the simulation of the drying process: A new maximum flow sensor applied to phase mobilities / I.W. Turner, P.A. Perre // Applied Mathematical Modelling. – 2001. – № 25. –P.513–540.
10. Perre P. 2-D solution for drying with internal vaporization of anisotropic media / P. Perre, I.W. Turner, J. Passard // AIChE Journal. – 1999. – № 45. – P.13–26.
11. Wang Z.H. Heat and mass transfer in fixed-bed drying / Z.H. Wang, G. Chen // Chemical Engineering Science. – 1999. – № 54. – P. 4233–4243.
12. Chen G. Theoretical study of microwave heating patterns on batch fluidized bed drying of porous material / G. Chen, W. Wang, A.S. Mujumdar // Chemical Engineering Science. – 2001. – № 56. – P. 6823–6835.
13. Ang T.K. Microwave freeze drying of food: A theoretical investigation / T.K. Ang, J.D. Ford, D.C.T. Pei // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1977. – № 20. - P. 517–526.
14. Lin S. Exact solution of the desublimation problem in a porous medium / S. Lin // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1982. – № 25. – P. 625–629.
15. Гайвась Б. Математичне моделювання конвективного сушіння матеріалів з урахуванням механотермодифузійних процесів / Б.Гайвась // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2010. – Вип. 12. – С. 9–37.
16. Лапшин Ю.Г. Некоторые задачи деформирования материалов при переменной температуре и влажности / Ю.Г. Лапшин // Известия вузов. Лесной журнал. — 1970. — Т. 1. — С. 45-50.
17. Соколовський Я.І. Методика та результати експериментальних досліджень реологічної поведінки деревини / Я.І. Соколовський, Й.В. Андрашек // Науковий вісник УДЛТУ. – 1999. – Вип. 9.13. — С. 15-26.