

УДК 663.252.1

THEORY AND TECHNOLOGY OF DRYING THERMOLABILE RAW MATERIALS IN MIXED ENERGY INSTALLATIONS

V. Potapov, E. Yakushenko

Kharkiv State University of Food Technology and Trade

Key words:

*Process
Energy efficiency
Drying kinetics
Mass transfer module
Conductive supply
Vegetable raw materials*

Article history:

Received 06.09.2017
Received in revised form
19.09.2017
Accepted 14.10.2017

Corresponding author:

V. Potapov
E-mail:
potapov@bigmir.net

ABSTRACT

The article is devoted to solving the scientific and applied problem of improving the energy efficiency of thermolabile raw materials drying process in mixed energy installations. One of the prospective methods of heat drying is drying with mixed heat supply (MHS-drying) as the method of obtaining highly porous prompt recovering product for subsequent direct grinding it into powder. The disadvantage of the current realization of the MHS-drying method is the presence of mixed convective and conductive heat supply, under which heat from the air is transferred by convective way to the surface of mass transfer module, and then conductively to internal layers. The use of the heater for conductive heat transfer, while the external convective flow acts as a desiccant, is proposed due to the working hypothesis of improving the energy efficiency of the drying process by separating the functions of heat and mass transfer between the internal heater and external airflow.

DOI: 10.24263/2225-2924-2017-23-5-1-9

ТЕОРІЯ І ТЕХНІКА СУШІННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНОЇ СИРОВИНИ В УСТАНОВКАХ ЗМІШАНОГО ЕНЕРГОПІДВОДУ

В.О. Потапов, Є.М. Якушенко

Харківський державний університет харчування та торгівлі

Стаття присвячена вирішенню науково-прикладного завдання підвищення енергоефективності процесу сушіння рослинної сировини в установках змішаного енергопідводу. Одним із перспективних способів теплового сушіння є сушіння зі змішаним тепlopідведенням (ЗТП-сушіння) як метод одержання високопористого швидковідновлювального продукту для подальшого безпосереднього здрибнювання в порошок. Недоліком існуючої реалізації способу ЗТП-сушіння є наявність змішаного конвективно-кондуктивного підведення теплоти, за якого теплота від повітря передається конвективним шляхом до поверхні масообмінного модуля, а потім від неї — до внутрішніх шарів кондуктивно. Відповідно до робочої гіпотези про підвищення енергоефектив-

ності процесу сушіння шляхом поділу функцій тепло- і масообміну між внутрішнім нагрівачем і зовнішнім потоком повітря запропоновано використання нагрівача для кондуктивної передачі теплоти, при цьому зовнішній конвективний потік виконує функцію поглинача вологи.

Ключові слова: процес, енергоефективність, кінетика сушіння, масообмінний модуль, кондуктивне підведення, рослинна сировина.

Постановка проблеми. Агропромисловий комплекс України — один із найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів у країні. Переробка плодів і овочів у харчові напівфабрикати й готові продукти здійснюється в досить великих масштабах, що потребує значних витрат енергії.

В Україні в останні роки збільшується виробництво рослинної сировини, проте, майже повністю відсутня переробка вторинної рослинної сировини. Вторинна рослинна сировина, перероблена в порошоків напівфабрикат, є найціннішою сировиною для харчової, хімічної, фармацевтичної та косметологічної промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш енерговитратним процесом переробки рослинної сировини є процес сушіння. На даний момент технологічні процеси сушіння та їхні апаратні реалізації неповною мірою відповідають сучасним вимогам до устаткування підприємств харчових виробництв. Підвищенням енергоефективності сушильного обладнання займалися такі вчені, як М.О. Гршин, Ю.Ф. Снежкін, О.Г. Бурдо, М.І. Погожих та ін.

Одним із перспективних способів теплового сушіння є сушіння зі змішаним теплопідведенням (ЗТП-сушіння) як метод одержання високопористого швидковідновлювального продукту для подальшого безпосереднього здрібнювання в порошок. Недоліком існуючої реалізації способу ЗТП-сушіння є наявність змішаного конвективно-кондуктивного підведення теплоти, при якому теплота від повітря передається конвективним шляхом до поверхні масообмінного модуля, а потім від неї — до внутрішніх шарів кондуктивно.

Тому була висунута гіпотеза про підвищення енергоефективності процесу ЗТП-сушіння шляхом поділу функцій тепло- і масообміну між внутрішнім нагрівачем і зовнішнім потоком повітря, при якому нагрівач використовується для кондуктивної передачі теплоти, а зовнішній конвективний потік виконує функцію поглинача вологи. У цьому випадку градієнти температур і потоку маси збігаються за напрямком.

Застосування кондуктивного підведення теплоти безпосередньо до матеріалу дасть змогу зменшити енерговитрати й збільшити продуктивність сушарок.

Мета дослідження: підвищення енергоефективності процесу сушіння в масообмінному модулі (МОМ) з використанням кондуктивного підведення теплоти й обґрунтування раціональних режимів сушіння рослинної сировини.

Викладення основних результатів дослідження. Проблема виробництва продуктів харчування, збагачених різними біологічно активними добавками, надзвичайно актуальна для України в умовах економічної й екологічної кризи. Це призвело до збільшення захворюваності населення, причиною якого значною мірою є деформація харчових раціонів. Тепер в Україні та

інших країнах відзначається високий рівень споживання населенням вуглеводнів і жирів, а споживання БАР, особливо вітамінів, порівняно з розвиненими країнами перебуває на досить низькому рівні (приблизно 50%). Фрукти, ягоди й овочі є одним з основних джерел життєво важливих для людини органічних речовин — вітамінів, мінеральних речовин, пектину тощо [1]. Споживання фруктів, а особливо ягід, має сезонний характер, тому більшу частину року їх споживають у консервованому вигляді. Недоліком промислової переробки плодів (стерилізація, пастеризація, гомогенізація, механічна обробка тощо) є руйнування й окислювання вітамінів, ароматичних та інших БАР, крім того, великий рівень відходів. Потреба у фруктово-ягідній продукції для дитячого харчування в Україні задовольняється не більше ніж на 20%.

Одним зі способів збагачення раціону харчування є додавання порошоків, отриманих різними способами сушіння [2].

Порошки дають змогу істотно розширити харчові ресурси, значно поліпшити асортименти нових видів харчових виробів, в яких у концентрованому вигляді збережені всі інгредієнти, що входять до складу вихідної сировини. Вони успішно можуть використовуватися в кондитерських, хлібобулочних, молочних продуктах, у продуктах масового харчування й харчоконцентратах.

Нині існують кілька різних методів одержання порошоків, які можна розділити на три групи.

До першої групи належать методи, за яких рослинна сировина перетворюється в пастоподібний або пюреподібний стан. Отриману масу потім висушують до низької кінцевої вологості, подрібнюють до одержання порошку й розфасовують у герметичну тару. При цьому, зазвичай, використовують кондуктивний, конвективний, конвективно-кондуктивний або сублімаційний метод сушіння. Порошки, отримані таким чином, добре розчинні в рідині й технологічні. Проте через високу гігроскопічність і пластичність до них додають наповнювачі — хімічно інертні речовини.

До другої групи належать методи одержання порошоків, в яких рослинна сировина безпосередньо збезводнюється кондуктивним, конвективним, конвективно-кондуктивним або сублімаційним способом. Потім висушений до низької вологості продукт подрібнюють до порошкоподібного стану, розділяють на фракції, які мають різний вміст цінних харчових речовин, і герметично запаковують.

Для подрібнення висушеної сировини існує величезна кількість різноманітних подрібнювальних пристроїв, які відрізняються конструктивно. Але для всіх цих способів характерні високі локальні температури на поверхнях робочих органів машин, що призводить до нагрівання оброблюваного матеріалу й спричиняє втрати значної частини біологічно активних і ароматичних речовин.

Вибір методу сушіння й типу сушильної установки повинен здійснюється на основі комплексного аналізу властивостей харчових матеріалів як об'єктів сушіння, а також одержання ресурсозберігаючих технологій виробництва порошоків.

Зневоднювання, яке застосовується для різних матеріалів, можна розділити за енергетичним принципом на видалення вологи без зміни його агре-

гатного стану (у вигляді рідини) і видалення вологи з матеріалу зі зміною його агрегатного стану.

Вибір раціонального способу сушіння для одержання порошків потрібно робити на основі технічних, технологічних і економічних показників. Основними способами сушіння на сьогодні є: кондуктивний, радіаційний, сублімаційний та інші.

Технічна реалізація сушарок відрізняється більшою конструктивною розмаїтістю за способом підведення теплоти до матеріалу, конструкцією сушильної камери, способом завантаження й вивантаження, ступенем автоматизації тощо.

У результаті проведеного аналізу сучасних способів сушіння термолабільної сировини встановлено, що найбільш перспективним методом сушіння є сушіння в установках змішаного енергопідводу [3].

Але недоліком існуючої реалізації способу змішаного енергопідводу є наявність конвективно-кондуктивного підводу теплоти, при якому теплота від повітря передається конвективним шляхом до поверхні тепломасообмінного модуля, а потім від її до внутрішніх шарів кондуктивно [4].

Таким чином, існує два лімітуючих фактори процесу сушіння (рис. 1): низьке значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією та наявність градієнта температур, який спрямовано проти внутрішнього потоку маси.

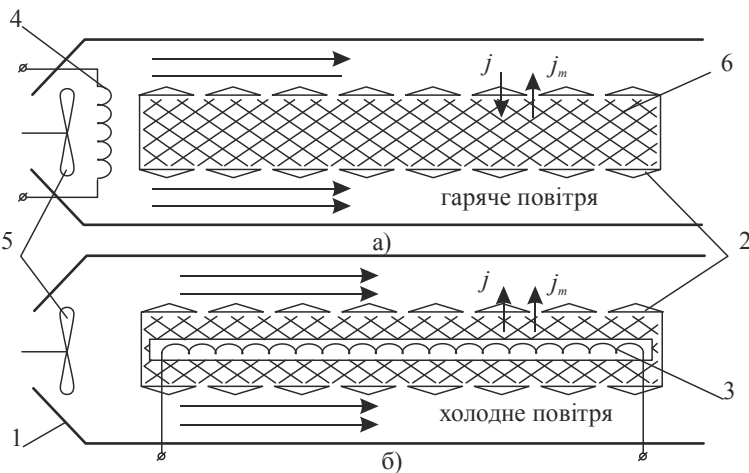


Рис. 1. Схема масообмінного модуля:

а) — конвективне підведення теплоти; б) — кондуктивне підведення теплоти;
 1 — сушильна камера; 2 — масообмінний модуль; 3 — внутрішній нагрівач; 4 — зовнішній нагрівач; 5 — вентилятор; 6 — продукт; j — потік теплоти; j_m — потік маси

Нами висунута гіпотеза про підвищення енергоефективності процесу сушіння шляхом поділу функцій тепло- і масообміну між внутрішнім нагрівачем і зовнішнім потоком, при якому нагрівач використовується для кондуктивної передачі теплоти, а зовнішній конвективний потік виконує функцію поглинача вологи. У цьому випадку градієнти температур і потоку маси збігаються за напрямками.

З метою з'ясування способу реалізації кондуктивного теплопідводу при сушінні були досліджені три варіанти MOM, які відрізнялися розташуванням і конструкцією тепловиділяючих елементів (рис. 2): внутрішній трубчастий нагрівач (ВТН); плоский поверхневий нагрівач (ППН); внутрішній плоский нагрівач (ВПН).

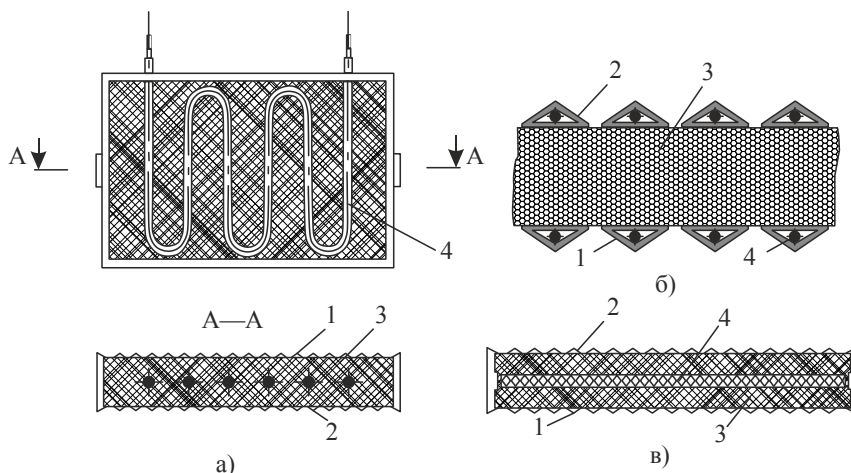


Рис. 2. Конструкція тепловиділяючих елементів у масообмінному модулі:
 а) внутрішній трубчастий нагрівач (ВТН); б) плоский поверхневий нагрівач (ППН);
 в) внутрішній плоский нагрівач (ВПН); 1 — дно; 2 — кришка; 3 — продукт; 4 — нагрівач

Відповідно до поставлених завдань були проведені теоретичні та експериментальні дослідження. Для теоретичного обґрунтування ефективності конвективного та кондуктивного теплопідводу до MOM нами була використана математична модель тепло-масоперенесення при сушінні на основі класичного рівняння теплового балансу (1) та отримані вирази для визначення залежності безрозмірного температурного напору: джерело теплоти — матеріал від процесних факторів у випадку конвективного (2) та кондуктивного теплопідводу (3):

$$c\rho V \frac{dT}{d\tau} = jS - r_w \rho V \frac{dw}{d\tau}, \quad (1)$$

де c — середня питома теплоємність продукту, Дж/(кг·К); T — середня температура продукту у MOM, К; w — середній вологовміст продукту, кг/кг; j — середня густина потоку теплоти всередині MOM, Вт/м²; ρ — середня густина продукту, кг/м³; V — об'єм MOM, м³; S — площа теплообмінної поверхні MOM, м²; r_w — питома теплота пароутворення, Дж/кг.

$$\Theta_{\text{конв}} = \frac{Bi_{\Sigma} + 2}{2Bi_{\Sigma}} (1 + Ko) / Fo; \quad (2)$$

$$\Theta_{\text{конд}} = \frac{(1 + Ko) / Fo + Bi_{\Sigma}}{2(1 + Bi_{\Sigma})}, \quad (3)$$

де $\Theta_{\text{конв}}$ — безрозмірний температурний напір при конвективному теплопідведенні; $\Theta_{\text{конд}}$ — безрозмірний температурний напір при кондуктивному теплопідведенні; $Bi_{\Sigma} = \frac{Bi}{1 + Bi_{\delta}}$ — симплекс числа Біо; Fo , Ko — числа Фур'є, Косовича.

Величина температурного напору в процесі сушіння слугує мірою апаратних енерговитрат у сушарці.

Отримані розрахункові залежності безрозмірних температурних напорів для двох способів теплопідводу (рис. 3), дають змогу зробити такі висновки:

- зі збільшенням інтенсивності процесу сушіння (відношення числа Коссовича до числа Фур'є) і зменшенням числа Біо, енерговитрати на процес сушіння зростають;

- при малій інтенсивності сушіння $(1 + Ko)/Fo$ апаратні витрати енергії у випадку конвективного теплопідводу ($\Theta_{\text{конв}} < \Theta_{\text{конд}}$) зменшуються;

- при великій інтенсивності сушіння апаратні витрати енергії зменшуються у випадку кондуктивного теплопідводу ($\Theta_{\text{конд}} < \Theta_{\text{конв}}$).

Таким чином, уперше теоретично обґрунтовано, що область енергоефективних режимів змішаного теплопідводу відповідає кондуктивному теплопідводу (рис. 4.), що викликає необхідність створення відповідної конструкції МОМ.

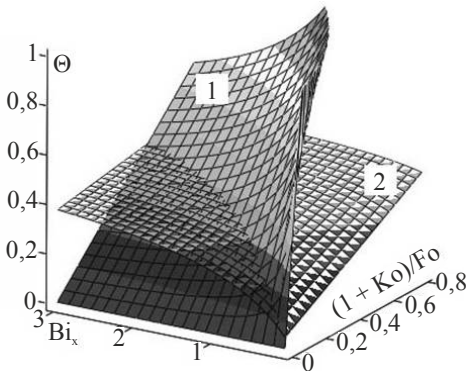


Рис. 3. Безрозмірний температурний напір у процесі сушіння за різних способів теплопідведення до МОМ:

- 1 — конвективне теплопідведення;
- 2 — кондуктивне теплопідведення

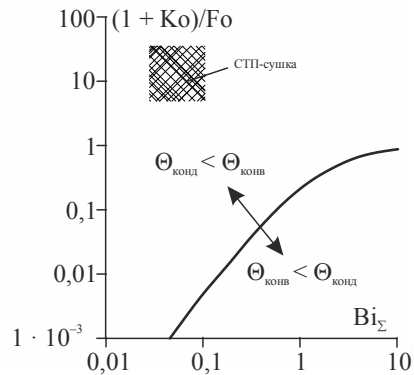


Рис. 4. Области енергоефективного використання конвективного й кондуктивного теплопідведення до МОМ

Ще одним із способів підвищення інтенсивності процесу сушіння є попереднє нагрівання матеріалу [5]. Ефективність цього технологічного прийому заснована на тому, що підвищення середньої температури матеріалу перед початком сушіння підвищує коефіцієнт внутрішнього масоперенесення, що, як відомо, і визначає загальну тривалість процесу.

Проте у літературних джерелах відсутні обґрунтовані рекомендації з вибору режимів попереднього нагрівання матеріалу, що висушується, виходячи з аналізу енерговитрат. Очевидно, що підвищення середньої температури

матеріалу, з одного боку зменшує тривалість процесу сушіння, але, з іншого — вимагає більшої тривалості прогріву, а отже, й більших загальних енерговитрат на весь процес сушіння.

У зв'язку з цим проведено моделювання попереднього прогріву матеріалу в MOM з метою визначення його впливу на подальший процес сушіння й пошук раціональних режимів загальних енерговитрат.

Варто враховувати, що у випадку застосування MOM із внутрішнім нагрівачем попереднє нагрівання матеріалу буде здійснюватися практично без масообміну, оскільки відсутній обдув модуля повітрям. Тому в цьому випадку такий технологічний прийом набагато ефективніший, ніж при використанні MOM з конвективним підведенням теплоти, коли процес випару вологи в першому періоді сушіння обмежує збільшення швидкості зміни температури матеріалу.

З метою експериментальної перевірки цього факту був поставлений експеримент. Експеримент проводився таким чином: після завантаження MOM виноградною вичавкою однакової маси масообмінний модуль розміщали в сушильній камері й включали його внутрішній нагрівач. Попереднє нагрівання здійснювали при постійній температурі нагрівача $t_n = 70^\circ \text{C}$ у плинні від 5 до 30 хв із кроком в 5 хв. Потім включався вентилятор і починав обдувати MOM повітрям (без його додаткового підігріву зовнішнім калорифером). Процес сушіння проводили до однакової кінцевої маси, що відповідала 6% вологовмісту.

На рис. 5 наведена кінетика сушіння виноградних вичавок у MOM із внутрішнім трубчастим нагрівачем і попереднім прогрівом продукту.

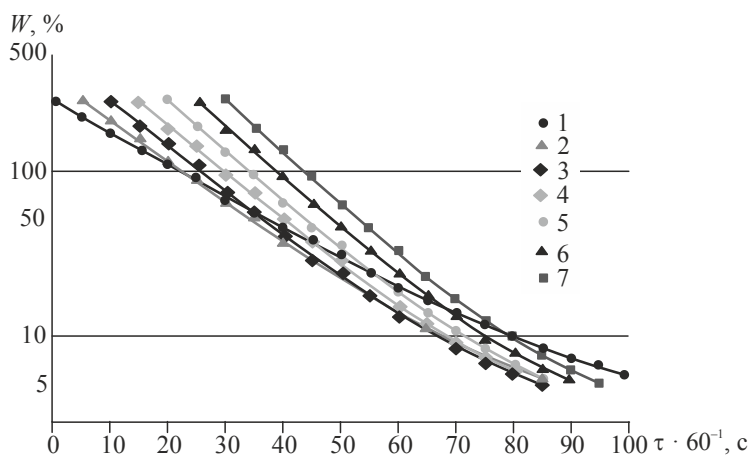


Рис. 5. Кінетика сушіння виноградних вичавок в MOM із внутрішнім трубчастим нагрівачем і попереднім прогрівом продукту: 1 — $\tau_n = 0$ хв; 2 — $\tau_n = 5$ хв; 3 — $\tau_n = 10$ хв; 4 — $\tau_n = 15$ хв; 5 — $\tau_n = 20$ хв; 6 — $\tau_n = 25$ хв; 7 — $\tau_n = 30$ хв.

Як видно з отриманих кінетичних залежностей, найбільша загальна тривалість процесу (прогрів + сушіння) спостерігається за відсутності попереднього прогріву (крива 1) і при попередньому прогріві MOM протягом 30 хв (крива 7). Аналогічні залежності були отримані при сушінні в MOM з іншими

дослідженими типами нагрівачів. На рис. 6 результати цих експериментів узагальнені у вигляді залежностей загальної тривалості процесу $\tau = \tau_c + \tau_n$ від тривалості етапу попереднього нагрівання виноградних вичавок τ_n .

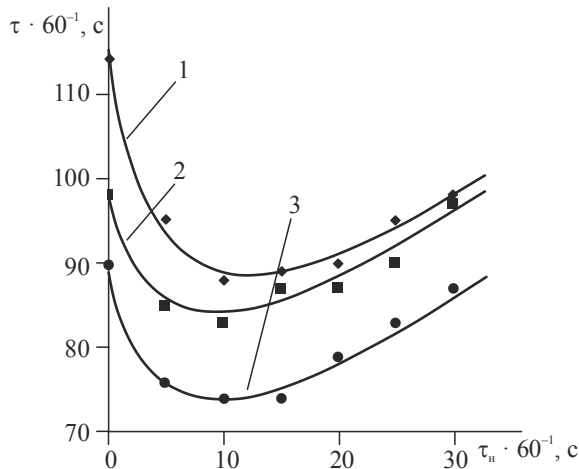


Рис. 6. Вплив тривалості попереднього прогріву виноградних вичавок на загальну тривалість процесу сушіння в MOM з різними типами внутрішніх нагрівачів: 1 — ППН; 2 — ВПН; 3 — ВТН

Як видно з наведених даних, попередній прогрів скорочує загальну тривалість процесу зневоднювання виноградних вичавок від 15 хв для ВПН до 27 хв для ППН, що становить 13...23% від тривалості сушіння без попереднього прогріву матеріалу. Оптимальна тривалість етапу попереднього прогріву, при якому загальна тривалість процесу мінімальна, становить 10 хв для ВТН і ВПН і 12,5 хв для ППН. Останній результат можна пояснити тим, що у випадку використання поверхневого нагрівача, як показано вище, інтенсивність процесу сушіння нижче внаслідок того, що потоки теплоти й вологи спрямовані в протилежні сторони. Тому матеріал прогривається повільніше й оптимальний час зміщується у бік більших значень.

Одним із головних показників якості продукту після сушіння є вміст у ньому біологічно активних речовин. Кінетика протікання хімічних і біохімічних реакцій визначає зміну харчової й біологічної цінності сировини [6]. Знаючи кінетику протікання цих реакцій, можна робити висновки про вплив режимів сушіння на якість сушеного продукту [7].

Тому отримано уточнене рівняння для визначення констант хімічних реакцій (рис. 7), що викликають зміну вмісту біологічно активних речовин у процесі сушіння що й дозволяє прогнозувати такі зміни при сушінні харчової рослинної сировини.

$$\Delta n_C^* = 100 - A\Theta^a Re^b, \quad (4)$$

де Δn_C^* — відносні втрати вітаміну С у процесі сушіння, %; Θ — безрозмірна середня температура нагрівач-повітря $\Theta = (T_c + T_n) / 2T_0$; T_c — температура повітря, К; T_n — температура нагрівача, К; Re — число Рейнольдса, де за

характерний розмір прийнятий еквівалентний діаметр каналу для повітря над масообмінним модулем.

Отримані залежності підтверджують використану для аналізу модель кінетики хімічних реакцій з БАР у процесі сушіння — збільшення середньої температури нагрівач-повітря збільшує втрати БАР, викликані зростанням швидкості хімічної реакції, а збільшення швидкості повітря — зменшує, що пояснюється зменшенням тривалості процесу сушіння, а отже, і тривалості відповідних хімічних реакцій.

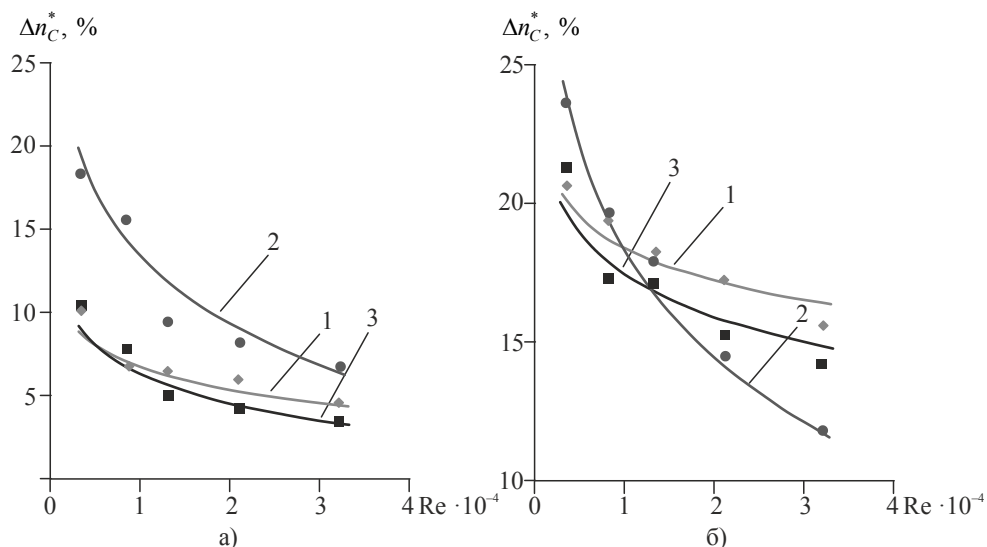


Рис. 7. Втрати вітаміну С під час сушіння виноградних вичавок у MOM залежно від числа Рейнольдса: а) $T_c = 293 \text{ K}$, $T_n = 307 \text{ K}$; б) $T_c = 327 \text{ K}$, $T_n = 307 \text{ K}$; 1 — ВРН; 2 — ПРН; 3 — ВРН

Як видно з отриманих залежностей, мінімум втрат аскорбінової кислоти забезпечує MOM із внутрішнім трубчастим нагрівачем і відсутністю додаткового підігріву повітря (рис. 6б). Втрати аскорбінової кислоти в цьому випадку становлять 3...8%, а при використанні повітря з підігрівом до 90° C — 12...20%.

Висновки

Встановлено емпіричну залежність питомої продуктивності MOM із внутрішнім нагрівачем від процесних факторів: пористості заповнення MOM продуктом, потенціалу сушіння, числа Рейнольдса, відносної масообмінної поверхні.

Встановлено, що найменші втрати аскорбінової кислоти в процесі сушіння рослинної термолабільної сировини (на прикладі сушіння виноградних вичавок у MOM) 3...8% спостерігаються у випадку використання внутрішнього плоского або трубчастого нагрівача й повітря без додаткового підігріву.

Показано, що раціональною конструкцією ТМOM, яка забезпечує максимальну питому продуктивність є модуль із відносною масообмінною поверх-

нею $S_M/S = 0,02$, пористість заповнення продуктом $\Pi \geq 0,6$, а мінімальна швидкість повітря в каналі над ТМОМ, що забезпечує стійкий ефект сушіння, відповідає числам Рейнольдса $Re > 10\ 000$.

Експериментально підтверджене існування оптимальних режимів попереднього прогріву (на прикладі сушіння виноградних вичавок у МОМ) із різними типами внутрішніх нагрівачів. Показано, що використання режиму попереднього нагрівання збільшує продуктивність МОМ по випаруваній волозі на 20...30% і підвищує коефіцієнт енергоефективності на 25...45% залежно від типу внутрішнього нагрівача.

Література

1. Батури́н А.К. Питание и здоровье: проблемы XXI века / А.К. Батури́н, Г.И. Мендельсон // Пищевая промышленность. — 2005. — № 5. — С. 105—107.
2. Снежкин Ю. Ф. Сравнение различных методов производства пищевых порошков / Ю.Ф. Снежкин, О.А. Кремнев, А.А. Хавин, Г.К. Клименко // Промышленная теплотехника. — 1985. — № 5, т. 7. — С. 4.
3. Погожих Н.И. Научные основы теории и техники сушки пищевого сырья в массообменных модулях : дис. ... д-ра техн. наук спец. 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств» / Н.И. Погожих. — Харьков, 2002. — 331 с.
4. Пак А.О. Розробка процесу сушіння плодово-ягідної сировини змішаним теплопідводом зі штучним пороутворенням : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств» / А.О. Пак. — Харьков, 2008. — 153 с.
5. Лыков А.В. Тепломассобмен : справочник / А.В. Лыков. — Москва : Энергия, 1971. — 476 с.
6. Сжов В.М. Біотехнологічні основи виробництва білка і пектину з відходів переробки плодів та винограду / В.М. Сжов, Г.Г. Валуйко, О.С. Луканін, І.Р. Клечак. — Київ : Урожай, 1993. — 120 с.
7. Павлюк Р.Ю. Новые технологии биологически активных добавок и их использование в продуктах иммуномодулирующего и радиозащитного действия / Р.Ю. Павлюк, А.И. Черевко. — Харьков; Киев, 2002. — С. 120.