

**Висновки.** Оптимальні умови НВЧ-сушіння харчової сировини у функціональних ємностях у частині його нагрівання на першому етапі забезпечуються за певного співвідношення між глибиною ФЄ й тривалістю НВЧ-нагрівання. При цьому сировина, що зневоднюється, нагрівається до заданої температури рівномірно по товщині при мінімальній потужності НВЧ-поля, що є одним з основних факторів підвищення енергоефективності процесу НВЧ-сушіння.

#### *Список літератури*

1. Погожих Н. И. Метод определения напряженности СВЧ-поля по темпу нагрева модельного тела / Н. И. Погожих, В. А. Потапов, Н. М. Цуркан, О. Ю. Гриценко // Научно-методологические аспекты энергоэффективности моделирования энерготехнологий – Одеса : ОНАХТ, 2011. – Вип. 39, том 2. – С. 16 – 18.
2. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А. В. Нетушил [и др.]. – М. ; Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 480 с.
3. Рогов И. А. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И. А. Рогов, С. В. Некрутман, Г. В. Лысов. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1981. – 200 с.
4. Романовский С. Т. Конвективный и комбинированный тепло- и массообмен при термической обработке капиллярнопористых материалов / С. Т. Романовский. – Минск : Наука и техника, 1977. – 155 с.

Отримано 30.03.2012. ХДУХТ, Харків.

© В.О. Потапов, М.М. Цуркан, 2012.

УДК 641.78:664

**В.О. Потапов**, д-р техн. наук, проф.

**С.М. Якушенко**, ст. викл.

### **КИНЕТИКА СУШІННЯ ВИНОГРАДНОЇ ВИЧАВКИ В ТЕПЛОМАСООБМІННОМУ МОДУЛІ З ВНУТРІШНІМ НАГРІВАЧЕМ**

*Наведено результати досліджень кінетики вологовмісту та температури в процесі сушіння змішаним теплопідведенням (ЗТП-сушіння) виноградної вичавки в тепломасообмінному модулі (ТМОМ) з внутрішнім нагрівачем.*

*Приведены результаты исследования кинетики влагосодержания и температуры виноградной выжимки в процессе сушки смешанным теплоподводом (СТП-сушки) в тепломассообменном модуле (ТМОМ) с внутренним нагревателем.*

*The paper presents the results of a study of the kinetics of moisture content and temperature of the grape pomace during STP-drying in the heat mass transfer unit with an internal heater.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Проблема виробництва продуктів харчування, збагачених різними біологічними активними добавками, надзвичайно актуальна для України в умовах економічної й екологічної кризи. Це призвело до збільшення захворюваності населення, причиною якого значним чином є існування деформації харчових раціонів. Фрукти, ягоди й овочі є одним з основних джерел життєво важливих для людини органічних речовин – вітамінів, мінеральних речовин, пектину й ін. Споживання фруктів, а особливо ягід, носить сезонний характер, тому більшу частину року їх споживають у консервованому вигляді. Недоліком промислової переробки плодів (стерилізація, пастеризація, гомогенізація, механічна обробка й ін.) є руйнування й окислювання вітамінів, ароматичних та інших БАП, 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 порошків, отриманих різними способами сушіння.

Виробництво порошків дозволяє реалізувати безвідхідні процеси переробки сільськогосподарської продукції, що є одним із перспективних шляхів раціонального використання сільськогосподарської сировини. На порошки можна переробляти нестандартну продукцію, оскільки порошок має низьку вологість (5...8%), і в ньому майже цілком припиняються біохімічні процеси, що збільшує тривалість збереження порошків у 2–3 рази стосовно тривалості збереження свіжої сировини.

Розглядаючи виноград і його вичавки як об'єкт переробки, слід зазначити низку особливостей, які впливають на вибір технології й теплотехнічного устаткування під час виробництва порошків. Однією з основних вимог до сировини під час переробки є високий вміст сухих речовин, які забезпечують необхідну якість продукції й високі техніко-економічні показники процесу. Ягоди, багаті на цінні природні компоненти, потребують турботливого ставлення до них у процесі технологічної переробки з метою максимального збереження цих речовин. Найменш стійкими під час переробки є ягоди з підвищеним вмістом фруктози, пектинових речовин і вітаміну С. Крім того, варто звертати увагу на неприпустимість появи в продукті сторонніх органічних і неорганічних включень, мікробіологічного забруднення й повну відсутність канцерогенних речовин.

У наш час існує два загальноприйнятих способи отримання порошків із фруктів, ягід і овочів: сушіння пюре та соків; механічний «тепловий» розмел сушених овочів або плодів за допомогою різних подрібнювачів.

У світовій практиці отримав поширення перший спосіб. Проте відомо, що під час отримання соків і пюре окислюється близько 20...40% вітаміну С. За теплового сушіння втрачається приблизно ще стільки ж.

Під час отримання порошоків із фруктів, ягід і овочів використовуються різні види теплового сушіння (розпилююче, вальцьове, конвеєрне, кондуктивне, тунельне та ін.), а в разі розмелювання застосовують різні млини, наприклад, дробарки ударної дії, які дозволяють отримати відносно однорідний продукт. Подрібнення в таких дробарках досягається в результаті ударів молотків по частинкам матеріалу, ударів частинок об кожух дробарки, зіткнення частинок і їх стирання. При цьому на стадії теплового сушіння та помелу втрачається значна частина вітамінів та інших БАВ, у процесі сушіння утворюються продукти розпаду з неприємним запахом і продукти карамелізації, у результаті змінюються смак, колір і аромат.

В Україні знайшов широке застосування спосіб одержання порошоків із вичавок за допомогою теплового сушіння та помелу, який використовується в кондитерській промисловості під час отримання замінича цукру. Ці порошки відрізняються низьким вмістом вітамінів.

Високу якість фруктових та овочевих порошоків отримано за допомогою сублімації сушіння соків і пюре. Основною перевагою методу сублімації є те, що біологічні та фізико-хімічні зміни в продукті мінімальні, вітаміни зберігаються на 96...98%. Сублімаційне сушіння мало застосовувалося в харчовій промисловості через його дорожнечу [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із найбільш перспективних способів сушіння для одержання високопористого швидковідновлювального продукту, у тому числі порошоків, є сушіння змішаним теплопідведенням (ЗТП-сушіння) у тепломасообмінних модулях (ТМОМ) [2]. Завдяки можливості отримання низького кінцевого вологовмісту (5...6%) за відносно короткої час (1,5...2 год) ЗТП-сушіння являє собою альтернативу сублімаційному сушінню через високу якість та малі енерговитрати [1]. У той же час за традиційною схемою ЗТП-сушіння до поверхні ТМОМ теплота від сушильного агента переноситься конвекцією, а далі від поверхні ТМОМ через сам продукт за рахунок теплопровідності. Очевидно, що такий спосіб теплопередачі має низьку ефективність. Як показано в роботі [3] використання кондуктивного підведення теплоти до матеріалу від внутрішнього обігрівача в ТМОМ дозволяє підвищити

енергоефективність ЗТП-сушіння. У цьому випадку, по-перше, значно зменшується термічний опір від джерела теплоти до продукту, по-друге, підвищується швидкість внутрішнього масоперенесення, оскільки напрямки потоків теплоти та маси співпадають (рис .1).

У роботі [4] визначено, що використання внутрішніх нагрівачів дозволяє підвищити показник енергоефективності сушіння в ТМОМ на 20...30% що до сушіння за конвекційного теплопідведення до ТМОМ. Вищезазначене визначило мету даної роботи.

**Мета та завдання статті.** Дослідження кінетики ЗТП-сушіння виноградної вичавки в тепломасообмінному модулі з різними типами внутрішніх нагрівачів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У процесі проведення досліджень використовувалися виноградні вичавки з винограду сорту “Молдова”. Дослідження включали проведення наступних експериментів: визначення можливості протікання процесу ЗТП-сушіння в ТМОМ, що розділений паронепроникною перегородкою(нагрівачем) навпіл; дослідження кінетики ЗТП-сушіння під час кондуктивного підведення теплоти (плоским внутрішнім нагрівачем усередині ТМОМ; трубчастим внутрішнім нагрівачем усередині ТМОМ; зовнішнім нагрівачем, що розташований на масообмінній поверхні ТМОМ); дослідження кінетики температури матеріалу в процесі ЗТП-сушіння з кондуктивним підведенням теплоти.

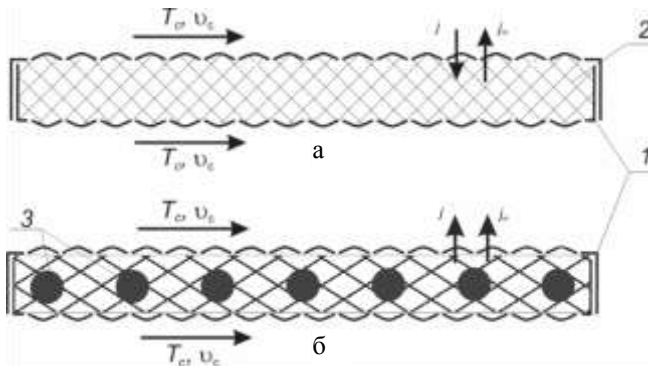


Рисунок 1 – Вигляд тепломасообмінних модулів: а) конвективне підведення теплоти; б) кондуктивне підведення теплоти; 1 – ТМОМ; 2 – сировина; 3 – внутрішній нагрівач;  $T_c, v_c$  – температура та швидкість сушильного агента;  $j$  – потік теплоти;  $j_m$  – потік маси

Вивчення кінетики сушіння проводилися з використанням ТМOM із габаритними розмірами у площині 200×120 мм, розмірами зазору між пластинами 0,5 і 3,5 мм та змінною товщиною ТМOM 30 і 60 мм. Кінетика вологовмісту вимірювалась прямим способом безпосередньо в процесі сушіння для чого сушильна камера з ТМOM, заповненим виноградною вичавкою, розміщувалась на електронних вагах. Кінетику середньої температури матеріалу в процесі сушіння визначали шляхом усереднення температур у центрі, на поверхні ТМOM та поверхні внутрішнього нагрівача. Температура вимірювалася термопарами, які було підключено до приладу МИТ-12ТС із ручним перемиканням на необхідну термопару.

Процес ЗТП-сушіння досліджувався в діапазоні температур внутрішнього нагрівача від 60 до 90° С за незмінної температури сушильного агента, який не підігрівався та мав температуру навколишнього середовища. Температура внутрішнього нагрівача підтримувалась постійною за весь період сушіння шляхом регулювання потужності нагрівача. У цій серії експериментів швидкість сушильного агента була незмінною 5 м/с, використовувався ТМOM завтовшки 60 мм із зазором між пластинами 1 мм. У ТМOM завантажувалася виноградна вичавка з однаковою масою це дозволило уникнути впливу початкового вологовмісту на результати експериментів. Експерименти проводились із трикратним повторюванням для кожної температури нагрівача.

На рис. 2 наведено кінетичні криві вологовмісту та температури під час сушіння виноградної вичавки в ТМOM із внутрішнім трубчатим нагрівачем. Результати показали, що на тривалість сушіння значно впливає температура внутрішнього нагрівача. У разі змінювання температури від 90 до 60° С тривалість сушіння збільшується в 2 рази. Відбувається зміна форми кінетичної кривої, яку можна спостерігати на залежності швидкості сушіння від вологовмісту. Це дозволило зробити висновок про те, що за низьких температур інтенсивність масообміну досягає максимального значення значно пізніше, ніж за високих.

Як і за традиційного конвекційного теплопідведення під час ЗТП-сушіння на отриманих термограмах можна виділити типові три періоди: період прогріву, період максимальної швидкості сушіння та період спадної швидкості сушіння.

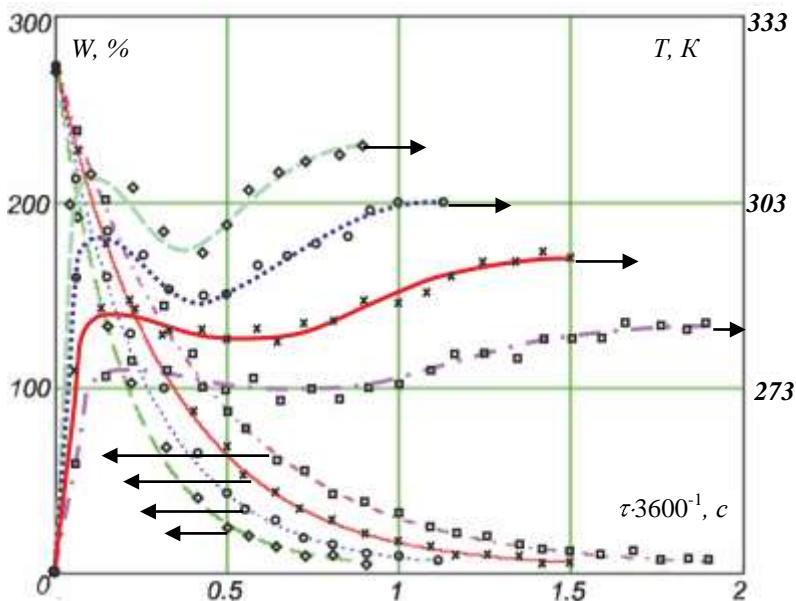


Рисунок 2 – Кінетика сушіння виноградної вичавки за різної температури внутрішнього трубчатого нагрівача:  $v = 5 \text{ м/с}$ ;  
 ◇ – 363 К; ○ – 353 К; \* – 343 К; □ – 333 К.

Суттєва відмінність даних кінетичних кривих від тих, що спостерігаються за конвекційного теплопідведення до ТМОМ, суттєве скорочення (майже в 2 рази) періоду прогріву, тому на кривих кінетики вологовмісту цей період практично не фіксується – швидкість сушіння постійно падає. Це викликане тем, що за кондуктивного теплопідведення термічний опір від джерела теплоти до матеріалу значно менший, чим від сушильного агента до матеріалу у випадку конвекційного теплообміну. Унаслідок цього волога швидко переміщується від внутрішнього нагрівача до масообмінної поверхні, спричиняючи велику швидкість сушіння на цьому етапі.

На другому етапі утворюється шар матеріалу з низьким вологовмістом поблизу внутрішнього нагрівача, а зона максимального випаровування переміщується ближче до масообмінної поверхні. Теплота не встигає підводитися від нагрівача через зростання термічного опору зневодненого шару та температура матеріалу падає.

Після випаровування більшої частини вільної води в капілярах настає третій період, коли температура матеріалу починає поступово зростати, наближаючись до свого рівноважного значення.

Слід зазначити, що середня температура матеріалу наприкінці сушіння менша, ніж температура внутрішнього нагрівача, оскільки висушений матеріал створює термічний опір між нагрівачем та сушильним агентом.

Аналогічний вигляд мають кінетичні залежності вологовмісту та температури в процесі сушіння в ТМOM з іншими видами нагрівачів: внутрішнім плоским нагрівачем (ВПН) та поверхневим плоским нагрівачем (ППН). За результатами цих експериментів було встановлено, що найбільшу інтенсивність сушіння забезпечує внутрішній трубчатий нагрівач (ВТН). Це пов'язано з тим, що за допомогою поверхневого плоского нагрівача потік теплоти спрямований назустріч потоку маси, як і за традиційного конвекційного теплопідведення (див. рис. 1). У свою чергу, внутрішній плоский нагрівач утворює паронепроникну перегородку між масообмінними поверхнями ТМOM, унаслідок чого затруднюється дифузія сушильного агента в об'єм матеріалу та спадає швидкість сушіння, особливо на третьому етапі.

Для апроксимації експериментальних даних було застосовано рівняння, запропоноване в монографії [5]. Похибка апроксимації даних залежністю 1 лежить у межах 5...7%:

$$W(\phi T_m) = W_p + (W_0 + W_p) \cdot e^{-a_{m0} \left( \frac{T_m}{T_0} \right)^n \cdot \frac{\tau}{R^2}}, \quad (1)$$

де  $W$  – вологовміст, кг/кг;

$a_{m0}$  – коефіцієнт дифузії вологи за початкової температури матеріалу, м<sup>2</sup>/с;

$n$  – емпіричний коефіцієнт;

$R$  – напівтовщина ТМOM, м;

$W_p$  – рівноважний вологовміст кг/кг;

$W_0$  – початковий вологовміст кг/кг;

$T_m$  – середня температура матеріалу за весь період сушіння, К;

$T_0$  – початкова температура матеріалу, К;

$\tau$  – час сушіння, с.

Після регресійної обробки даних отриманих кінетичних залежностей було знайдено значення  $a_{m0}$  та  $n$  різних типів внутрішніх нагрівачів. Відповідні дані наведено в табл. 1

Це дало змогу запропонувати просту формулу для визначення тривалості сушіння виноградної вичавки в ТМOM із кондуктивним підведенням теплоти від внутрішнього нагрівача.

$$\tau(T_m) = -\ln \left[ \frac{(W_k - W_p)}{(W_0 - W_p)} \right] \cdot \frac{R^2}{a_{m0} \cdot \left( \frac{T_m}{T_0} \right)^n} \quad (2)$$

Розрахунки за цією формулою показують, що за однакових умов при температурі нагрівача 70° С тривалість сушіння в ТМОМ із використанням внутрішнього трубчастого нагрівача на 10% менше, ніж із внутрішнім плоским нагрівачем, та майже на 30% менше, ніж із поверхневим плоским нагрівачем.

**Таблиця – Значення коефіцієнтів масоперенесення під час сушіння в ТМОМ із різними типами внутрішніх нагрівачів**

	$a_{m0}, \text{м}^2/\text{с}$	$n$
ППН	$1.74 \cdot 10^{-7}$	9.3
ВПН	$2.46 \cdot 10^{-7}$	7.0
ВТН	$2.43 \cdot 10^{-7}$	8.3

**Висновки.** Таким чином, на підставі дослідження впливу конструкції внутрішніх нагрівачів у ТМОМ на кінетику сушіння виноградної вичавки встановлено скорочення періоду прогріву матеріалу в ТМОМ майже вдвічі, що спричиняє більшу швидкість сушіння на першому етапі порівняно із сушінням у ТМОМ із конвекційним тепlopідведенням. Найбільша інтенсивність сушіння спостерігаються в разі використання внутрішнього трубчастого нагрівача, яка на 10% вище, ніж із внутрішнім плоским нагрівачем, та на 30% більша, ніж із поверхневим плоским нагрівачем. Отримано рівняння для розрахунку тривалості сушіння виноградної вичавки під час сушіння в ТМОМ із внутрішніми нагрівачами.

#### *Список літератури*

1. Новые технологии витаминных углеводсодержащих фитодобавок и их использование в продуктах профилактического действия / Р. Ю. Павлюк [и др.] – Х. : ХДУХТ, 1997. – 291 с.
2. Погожих М. І. Наукові основи теорії й техніки сушіння харчової сировини в масообмінних модулях : дис. ... д-р техн. наук : 05.18.12 : захищена 04.06.2002 / Погожих Микола Іванович. – Х., 2002. – 331 с.
3. Потапов В. О. Розробка моделі процесу змін якості виноградної вичавки під час ЗТП-сушіння / В. О. Потапов, Є.М. Якушенко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць. – Х. : ХДУХТ, 2010. – Вип. 1 (10). – С. 45–48.



4. Потапов В. О. Исследование энергоэффективности процесса сушки в теплообменных модулях с внутренним нагревателем / В. О. Потапов, С. М. Якушенко // 36. науч. пр. – Одеса : ОНАХТ, 2010. – Выпуск 37. – С. 32–37.

5. Потапов В. О. Кінетика сушіння: аналіз і керування процесом : монографія / В. О. Потапов. – Х. : ХДУХТ, 2009. – 250 с.

Отримано 30.03.2012. ХДУХТ, Харків.

© В.О. Потапов, С.М. Якушенко, 2012.

УДК 535-1:536

**А.А. Завалий**, канд. техн. наук (ЮФ НУБиП Украины «КАТУ», Симферополь)

**И.В. Янович**, (ЮФ НУБиП Украины «КАТУ», Симферополь)

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В УСТРОЙСТВАХ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ**

*Описано конструкцію експериментальної інфрачервоної сушильної камери. Розроблено системи та методики вимірювання режимних параметрів процесу інфрачервоного сушіння: температури, вологості повітря, маси продукту, щільності теплових потоків.*

*Описана конструкция экспериментальной инфракрасной сушильной камеры. Разработаны системы и методики измерения режимных параметров процесса инфракрасной сушки: температуры, влажности воздуха, массы продукта, плотности тепловых потоков.*

*The design of an experimental infrared drying chamber. Developed systems and methods for measuring operational parameters of the process of infrared drying temperature, air humidity, the mass of the product, the heat flux density.*

**Постановка проблемы в общем виде.** Инструментальной основой выполнения экспериментальных исследований процесса инфракрасной (ИК) сушки являются экспериментальные установки, включающие в себя системы управления режимами сушки, продукты сушки, методы и средства измерения физических величин. При выполнении эксперимента измерению подлежат: температура продукта сушки, температура воздуха в объеме сушильного устройства, относительная влажность воздуха в объеме устройства, масса продукта сушки, лучистый тепловой поток, падающий на поверхность лотка сушильной камеры [1]. Режим сушки задают временными зависимостями тепловой мощности, затрачиваемой на процесс сушки, и интенсивности воздухообмена устройства сушки.