

Змішано дифузійно хімічний механізм, для якого не можна нехтувати ні одним членом рівняння (рівняння 1).

Аналіз процесу екстрагування олії з не подрібненого насіння показав, що процес протікає дуже повільно, і характеризується низькими значеннями коефіцієнтів дифузії  $D=a \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Вплив температури кипіння та природи розчинника на процес екстрагування показав, що природа екстрагента відіграє домінуючу роль порівняно з температурою кипіння розчинника.

#### Література

1. Семенишин Є.М. Теоретические основы извлечение твердого вещества в условиях прямого тока и противотока. Журнал "Химическая технология", Киев, 1980, 5, С.60 - 62.
2. Семенишин Є.М., Стадник Р.В., Ятчишин Ю.Й. Екстрагування цільових компонентів з амаранту гібриду (*Amaranthus hybridus*). Наукові праці ОНАХТ, Міжнародна науково-практична конференція і школа-семінар «Проблеми енергетичної ефективності харчових і хімічних виробництв», Одеса, 2009 р., с. 96–100
3. Семенишин Є.М., Ятчишин Ю.Й., Стадник Р.В. Хімічна промисловість України. Київ, № 2(97) 2010, с.19–22.
4. Аксельруд Г.А., Семенишин Є.М. Журнал физической химии. М., Т.1, 10, 1976, с. 2568–2571.

УДК 664.83.047.8

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ СУШІННЯ ТОПІНАМБУРА У ВІДЦЕНТРОВОМУ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Поперечний А.М., д.т.н., професор, Жданов І.В., Асманова Ю.В.  
Донецький національний університет економіки і торгівлі  
імені Михайла Туган-Барановського, м. Донецьк

*В статті наведені результати експериментальних досліджень з кінетики сушіння частинок топінамбуру у відцентровому псевдозрідженому шарі.*

*In article is described results of the experimental researches of kinetics of the drying the particles of the topinambour (*Helianthus tuberosus*) in centrifugal pseudoreified layer.*

**Ключові слова:** сушіння, відцентровий псевдозріджений шар, кінетика, топінамбур.

Постановка проблеми. В останні роки все більше уваги приділяється розробці технології отримання харчових продуктів діабетичного і профілактичного призначення на основі переробки інуліновмістної рослинної сировини, до якої відноситься топінамбур, цикорій, якон [1]. Висушені порошки з цих клубнеплодів використовуються в якості харчових добавок у м'ясні і рибні напівфабрикати. Ці добавки є додатковим дешевим джерелом біологічно активних речовин. Окрім того, вони утворюють легкозв'язні стабільні комплекси, які покращують травлення та органолептичні показники напівфабрикатів [2, 3]. Деякі автори відмічають перспективу використання вищевказаних порошоків у виробництві дієтичних хлібобулочних і кондитерських виробів, а також в якості заміниці цукру у виробництві діабетичних продуктів харчування [1, 4].

У промислових масштабах для виробництва сушених порошоків з вищевказаних клубнеплодів використовують конвективні конвеєрні сушарки, на яких топінамбур висушують до кінцевої вологості 5...8 % (тривалість процесу 3,5...5,5 годин при температурі повітря 70...95 °С) [4], цикорій – до кінцевої вологості не вище 12...14 % [1] (тривалість процесу 3,5...4,5 години при температурі повітря 50...70 °С). Велика тривалість традиційних процесів сушіння продукту у нерухомому шарі обумовлює низьку харчову цінність і якість готового продукту. У зв'язку з цим існує необхідність розробки сучасної технології сушіння, яка б дозволила отримати продукт високої якості.

У науково-технічній літературі є ряд публікацій, в яких описані дослідження з сушіння інуліновмістної рослинної сировини нетрадиційними способами. Наприклад, у роботах [4, 5] досліджена кінетика сушіння топінамбура з використанням в якості теплоносія перегрітої пари атмосферного тиску в імпульсному псевдозрідженому шарі. Сушіння досліджувалось в діапазоні зміни наступних технологічних параметрів процесу: температура пари 140–150 °С, швидкість потоку пари на вході у шар продукту 0,8...8,0 м/с, питома навантаження продукту на решітку 15...30 кг/м<sup>2</sup>, сировина – кубик з

розміром граней від 6 до 8 мм. На першій стадії топінамбур оброблювали перегрітою парою в щільному шарі зі швидкістю 0,8 м/с протягом 180 с, на другій стадії – парою зі швидкістю 1,8 м/с протягом 3,0...3,5 с в псевдозрідженому шарі. Ця двостадійна обробка повторювалася протягом 36 хв. Автори відмічають, що при імпульсному підведенні теплоносія шар топінамбура активно перемішується, руйнуються комки; це сприяє рівномірному сушінню. Однак, треба відзначити, що у наведених дослідженнях відсутній аналіз хімічного складу висушеного порошку, доцільність якого обумовлена тривалою дією на продукт високої температури, яка спричиняє процеси карамелізації і меланоїдіноутворення [9]. Наслідком цих процесів є значне руйнування інуліну цільового компонента висушеного порошку з топінамбуру.

В роботі [1] досліджена кінетика сушіння якона в вигляді ломтиків товщиною 1 мм комбінованим радіаційно-конвективним способом. Сировину на сіткових подиках в шафі з ІЧ-випромінювачами сушили від початкової вологості 90 % до кінцевої 6 %. Тривалість сушіння складала 120–180 хв. Аналізом кривих сушіння встановлено значний великий вплив на тривалість процесу розташування подиків відносно інфрачервоних випромінювачів. Автори рекомендують наступні параметри сушіння: температуру 61...62 °С, тривалість 110 хв. Для отриманого порошку визначені органолептичні і фізико-хімічні показники. Серед них треба відмітити світло-коричневий колір, вміст інуліну 10 %, вміст фруктози 20 %. Разом з перевагами описаного способу сушіння треба відмітити і недоліки – складність забезпечення рівномірної обробки нерухомого шару продукту внаслідок нерівномірності інфрачервоного поля та малу продуктивність промислових апаратів періодичної дії. Підтвердженням першого недоліку є світло-коричневий колір висушеного продукту, який свідчить про наявність під час обробки процесів карамелізації і меланоїдіноутворення. Велика кількість фруктози свідчить також про частковий розпад інуліну.

Кінетика процесу сушіння топінамбура у псевдозрідженому шарі (ПЗШ) [7] досліджена в діапазоні зміни технологічних параметрів: температура повітря 60...115 °С, розмір грані кубиків продукту 5, 6, 8, 10, 12 мм, питома навантаження продукту на газорозподільну решітку 15...25 кг/м<sup>2</sup>, швидкість повітря 2,2 м/с. Сушили від початкової вологості 78 % до кінцевої 9...14 %. Тривалість сушіння в залежності від розмірів частинок продукту і температури повітря складала 36...137 хв. Відмічаються високі органолептичні показники висушеного продукту. Аналізом кривих сушіння, швидкості сушіння та зміни температури в центрі кубика продукту рекомендуються наступні раціональні режимні параметри: температура повітря 80...100 °С, швидкість повітря 2,2...2,4 м/с, питома навантаження на газорозподільну решітку 20...25 кг/м<sup>2</sup>, нарізка продукту – кубики з розміром ребра 6...8 мм. Зауважується на безперспективність застосування високих температур у розвитій стадії ПЗШ для сушіння ряду продуктів рослинного походження (особливо для топінамбуру). Для підтвердження цього висновку приводяться результати дослідів з використанням сушильного агента з температурою 120, 140 і 160 °С. Досліди показали, що на початку процесу зовнішня поверхня кубиків швидко обезводнюється, в результаті чого утворюється щільна скоринка, яка в подальшому чинить значний опір процесу вологообміну. Крім того, має місце підгоряння зовнішньої поверхні частинок продукту та їх значна усадка.

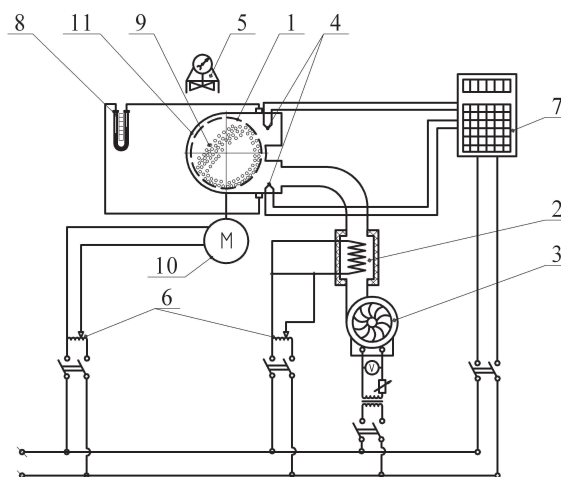
Таким чином, аналіз досліджень з сушіння інуліновмісної сировини різними способами показує, що найкращі показники готового продукту забезпечуються при сушінні у ПЗШ теплоносієм температурою до 100 °С.

Як показали дослідження по сушінню картоплі, моркви і буряку [8–10], прискорити процес сушіння із збереженням переваг ПЗШ можливо за рахунок застосування відцентрового поля. Клубні топінамбура за хімічним складом близькі до клубнів картоплі. Електронномікроскопічні дослідження кліток топінамбура також показують їх велику схожість з клітками картоплі [11].

Отже, метою нашої роботи є дослідження сушіння топінамбура у відцентровому псевдозрідженому шарі (ВПЗШ).

Дослідження проводилися на експериментальній установці, принципова схема якої наведена на рисунку 1.

Установка складається з наступних основних вузлів: сушильної камери, редукторного двигуна, осьового вентилятора, електрокалорифера, блоку живлення з вимірювальними приладами. Сушильна камера представляє собою нерухомий металевий циліндричний корпус, в середині якого розташований перфорований барабан, консольно закріплений на валу редукторного електродвигуна. У нижній частині камери є патрубок прямокутного перетину для тангенціального введення сушильного агента, у верхній – такий же патрубок для виводу сушильного агента. Корпус жорстко закріплений на стійці. Для завантаження продукту і ведення візуальних спостережень у барабані передбачені прозорі торцеві дверці.



1 — перфорований барабан, 2 — калорифер, 3 — вентилятор, 4 — термопари ТР-01А,  
5 — анемометр крильчатий В5 типу Б ГОСТ 6376-74, 6 — ЛАТР, 7 — потенціометр КСП-4,  
8 — U-образний манометр, 9 — продукт, 10 — редукторний електродвигун, 11 — сушильна камера

**Рис. 1 – Принципова схема експериментальної установки для сушіння рослинної сировини в ВПЗШ**

Повітря, що подається вентилятором 3, нагрівається і регулюється в електрокалорифері 2 за допомогою ЛАТРа 6. Редукторний електродвигун 10 живиться електричним струмом через ЛАТР 6, завдяки цьому регулюється частота обертання барабана. Сумісна дія потоку повітря і відцентрового поля від обертання барабана створює ефект ВПЗШ. Для вимірювання температури повітря у входному і вихідному патрубках встановлені хромель-копелеві термопари 4 (діаметр дроту термопар  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м) у комплекті з потенціометром 7. Вимірювання швидкості повітря здійснюється за допомогою анемометра 5, а його регулювання – за допомогою змінного резистора. Вимірювання падіння тиску повітря в сушильній камері здійснюється за допомогою U-образного манометра 8.

Перед проведенням дослідів здійснювалася попередня обробка топінамбуру і нарізка очищеного продукту кубиками з розмірами  $5 \times 5 \times 5$  та  $10 \times 10 \times 10$  мм. Перед кожним дослідом установка була налагоджена на певний режим роботи (прогрівали калорифер, встановлювали робочу температуру і швидкість повітря тощо). Досягнення робочого стану визначали за сталими режимними параметрами.

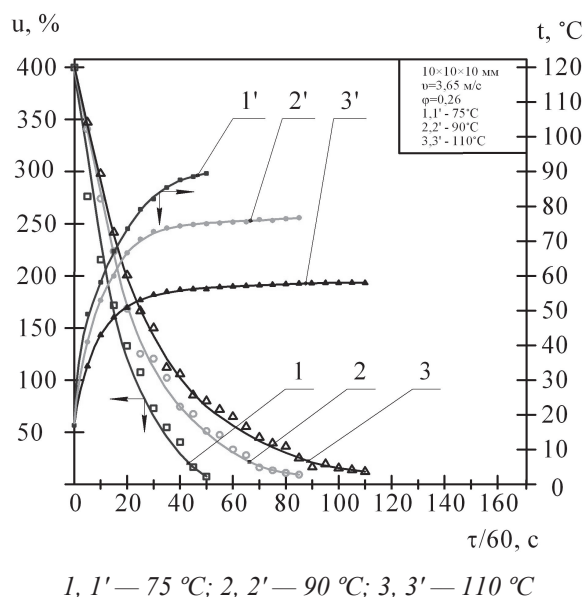
Досліди проводили в наступній послідовності. Підготовлений продукт завантажували в барабан. Після завантаження продукту включали електродвигун. Швидкість обертання барабана із продуктом регулювали до утворення стійкого ВПЗШ. Через задані інтервали часу з барабану робили відбір проб продукту в бюкси для визначення вологовмісту за стандартною методикою висушуванням до постійної маси (ГОСТ 15113.4-77). При дослідженні зважування здійснювалося на аналітичних електронних терезах марки ВР-02 МС4, температура в середині частинки продукту вимірювалася за допомогою термопари.

На підставі експериментальних даних побудовані криві зміни вологовмісту, швидкості сушіння та температури в середині частинки продукту.

На рисунку 2 зображені криві сушіння і температури в центрі кубика топінамбура розміром  $10 \times 10 \times 10$  мм при різній температурі повітря на вході в робочу камеру. Як показує аналіз кривих 1, 2, 3, процес сушіння протікає практично в два періоди – постійної і спадаючої швидкості. В період постійної швидкості видаляється вільна волога, в період спадаючої швидкості – зв'язана. Критичне значення вологовмісту, яке характеризує перехід від першого періоду до другого, лежить в межах 200–240 %, кінцевий вологовміст – в межах 7,7...12,2 % в залежності від температури повітря. Температура повітря значно впливає на тривалість процесу. При її значенні  $75^\circ\text{C}$  процес сушіння до кінцевого вологовмісту 12,2 % триває близько 105 хв, тоді як при  $105^\circ\text{C}$  до кінцевого вологовмісту 7,7 % – близько 45 хв, тобто в 2,3 рази швидше.

Скорочення тривалості сушіння відбувається в першу чергу за рахунок більшого значення швидкості сушіння в перший період. Для кривої 1 ця швидкість складає 12,52 %/хв, для кривої 2 – 13,81 %/хв, для кривої 3 – 16,53 %/хв.

Як показує аналіз кривих 1', 2', 3', ріст температури в центрі кубика топінамбура відбувається дуже інтенсивно.



**Рис. 2 – Криві сушіння і температури в центрі кубіка топінамбура розміром 10×10×10 мм при різній температурі повітря**

Органолептичні показники, а також форма готового продукту, значно відрізняються для різних температур повітря. При температурі повітря 75 і 90 °C під час сушіння відбувається значна усадка кубиків топінамбура. Вони втрачають свою початкову форму: центри граней зміщуються до центру частинки. При температурі повітря 110° C початкова форма кубиків топінамбура не змінюється (окрім загального зменшення об'єму кубика), що свідчить про об'ємний характер випаровування вологи, обумовлений високою температурою теплоносія.

Колір готового продукту змінюється від ледве жовтого (при температурі повітря 75 °C) до світло-коричневого (при температурі повітря 110 °C). Певна різниця також є і у структурі. Якщо кубики, висушені при температурі 110 °C, тверді, крихкі та легко піддаються подрібненню у порошок, то частинки топінамбура, висушені при температурах 75 °C і 90 °C, в'язкі і погано подрібнюються в наслідок налипання на робочий орган подрібнювача. Смак у всіх випадках солодкий, характерний для даного продукту.

Колір та структура готового продукту свідчить про різний ступінь завершеності реакцій карамелізації і меланоїдіноутворення, обумовлений різною температурою теплоносія. Світло-коричневий колір та відповідна структура для кубиків топінамбура, висушених при температурі 110 °C, свідчить про більш глибокі зміни вуглеводного комплексу. Тому така температура повітря призводить до значних втрат цільової складової топінамбура – інуліну.

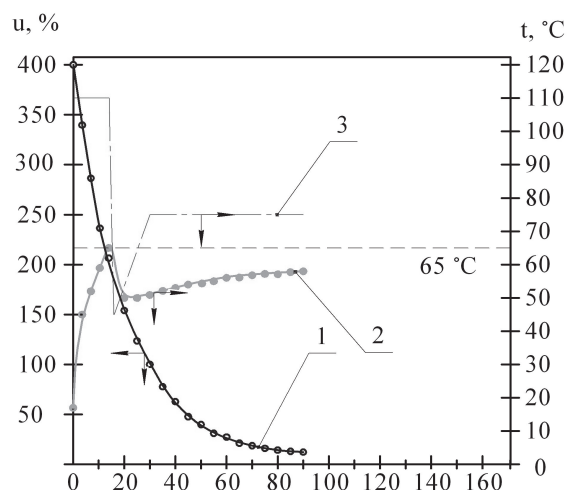
З іншого боку, сушіння при більш низьких температурах призводять до значного збільшення тривалості процесу і більших енерговитрат. Тому оптимальним режимом сушіння з точки зору максимального ступеню збереження цільового компонента і мінімальних енерговитрат є ступеневий режим обробки, який на першій стадії передбачає використання повітря з високою температурою 110 °C, на другій стадії – з більш низькою 75° C. Тривалість першої стадії для кубиків розміром 10×10×10 мм можна визначити за температурною кривою 3' – це момент часу, коли температура у центрі частинки сягне 65 °C. Це відбувається через 14 хв після початку процесу.

На рисунку 3 наведені криві сушіння 1, температури в центрі кубіка топінамбура 2 і температури повітря на вході в робочу камеру 3 при вищевказаному ступеневому режимі сушіння.

Як показує крива 3, температура повітря після 14 хв була різко знижена до 45 °C для попередження перегрівання продукту і далі підвищена до 75 °C. Аналіз кривої 2 показує, що застосований ступеневий температурний режим забезпечив протягом всього процесу температуру в середині кубиків нижче 60 °C, а тривалість сушіння склала близько 90 хв.

**Висновки.**

Проведені дослідження з сушіння топінамбура при різних робочих параметрах дозволили визначити оптимальний режим, який дозволяє зберегти під час сушіння велику кількість інуліну при значній інтенсивності процесу.



**Рис. 3 – Криві сушіння 1, температури в центрі кубика топінамбура 2 і температури повітря на вході в камеру 3 при ступеневому режимі**

### Література

1. Корнеева, О.С. Исследование процесса сушки нетрадиционного инулинсодержащего сырья / О.С. Корнеева, О.М. Омельченко, П.Ф. Кононков // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2001. – №1 – С.42-43.
2. Максименко, Г.Є. Вплив рослинної добавки з гарбуза та топінамбура на якісні показники січених м'ясних напівфабрикатів / Г.Є. Максименко // *Збірник наукових праць ЛНАУ*. – Луганск, 2008. – Вип.87 – С.140-147.
3. Максименко, А.Е. Влияние разного соотношения сухой тыквы и топинамбура в смеси растительной добавки на свойства рубленых полуфабрикатов / А.Е. Максименко // *Збірник наукових праць ЛНАУ*. – Луганск, 2008. – Вип.87 – С.148-155.
4. Остриков, А.Н. Кинетика сушки топинамбура перегретым паром / А.Н. Остриков, И.А. Зуев // *Известия вузов. Пищевая технология* – 2005. – №2-3 – С.87-89.
5. Остриков, А.Н. Математическая модель процесса сушки топинамбура перегретым паром / А.Н. Остриков, И.А. Зуев // *Техника и технология пищевых производств: тез. докл. V Междунар. науч.-техн. конф., 18-20 мая 2005 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»*; редкол.: Т.С. Хасаншин (отв. ред.) [и др.]. – Мн.: Изд. центр БГУ, 2005. - С.203-204.
6. *Технология продукции общественного питания. В 2-х т. Т.1. Физико-химические процессы, протекающие в пищевых продуктах при их кулинарной обработке: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Технология продуктов общественного питания»* / А.С. Ратушный [и др.]; под ред. А.С. Ратушного. – М.: Мир, 2004. – 351 с.
7. Поперечный, И.А. Интенсификация процессов обжарки зернистого пищевого сырья : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / И.А. Поперечный. – Х., 1994. – 18 с.
8. Поперечный, А.М. Кінетика сушіння картоплі у відцентровому псевдозрідженому шарі / А.М. Поперечний, І.В. Жданов // *Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр.* - ДонДУЕТ, 2007. – Вип.16. – С. 110-115.
9. Поперечный, А.Н. Сушка пищевого растительного сырья в центробежном псевдооживленном слое / А.Н. Поперечный, И.В. Жданов // *Хранительна наука, техника и технологии: Научні труд.* – Пловдив: Университет по хранителни технологии, 2007. – Том LIV, Св.3, Volume LIV, Issue 3. – С.137-141.
10. Поперечный, А.Н. Экспериментальное исследование массопереноса при сушке овощей в центробежном псевдооживленном слое / А.Н. Поперечный, И.В. Жданов // *Наук. праці ОНАХТ*. – Одеса, 2008. – Вип. 32. – С.182-186.
11. Василик, О.И. Анализ строения и изменения растительной ткани топинамбура под воздействием технологических параметров / О.И. Василик, Н.В. Ремесло, Л.А. Федоренченко, Е.И. Сидорченко // *В сб.: тезисы докл. Респ. научн.-техн. конф. Киев. технол. ин-т пищ. пром-ти.* – Киев, 1991. – С.161-162.