

**А.М. Поперечний**, д-р техн. наук (ДонНУЕТ, Донецьк)

**І.В. Жданов**, канд. техн. наук (ДонНУЕТ, Донецьк)

**С.Ю. Попова** (ДонНУЕТ, Донецьк)

## **СУШІННЯ ПЮРЕ З КАРТОПЛЯНИХ ВІДХОДІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РАДІАЦІЙНОГО ТЕПЛОПІДВЕДЕННЯ**

*Наведено результати експериментальних досліджень з радіаційного сушіння пюре з картопляних відходів та їх математична обробка.*

*Приведены результаты экспериментальных исследований по радиационной сушке пюре из картофельных отходов и их математическая обработка.*

*In article results of experimental researches on radiating drying of mashed potatoes waste and their mathematical processing are resulted.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Під час виробництва продуктів із картоплі утворюється до 45% відходів залежно від особливостей технології виробництва. Основна маса відходів картоплі використовується на корм для тварин та виробництво крохмалю [1].

Ще одним перспективним напрямом може стати використання картопляних відходів у виробництві хлібобулочних виробів. Прискорена технологія виробництва хлібобулочних виробів передбачає заміну традиційного цукру на порошок, вироблений з картопляних відходів. Актуальність цієї технології полягає у постійному зростанні попиту на цукор у світовому масштабі і, як наслідок, необхідності пошуку більш дешевих його замінників.

Виробництво порошку з картопляних відходів за технологією, що пропонується, включає такі сновні стадії: подрібнення до пастоподібного стану, заморожування та сушіння. Метою заморожування є збільшення кількості редукованих сахарів (глюкози, мальтози та фруктози) в результаті гідролізу крохмалю. Метою сушіння є зниження вологості розмороженого продукту з 75...78%, що характерно для твердих картопляних відходів, до 12%, що, відповідно до ГОСТ 13342-77, забезпечує тривале його зберігання.

Одним із головних чинників, які визначають доцільність запропонованої технології, є собівартість порошку з картопляних відходів. Вона, в першу чергу, визначається обраним способом сушіння як найбільш енерговитратна стадія.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У промисловості сушіння пастоподібної сировини здійснюється декількома способами.

Одним із найбільш розповсюджених є кондуктивний спосіб, що здійснюється на вальцових сушарках. Він передбачає нанесення продукту тонкою плівкою на металеву циліндричну поверхню обертового барабану, яка підігрівається парою чи електричними нагрівачами. Завдяки тонкому шару продукту та інтенсивному теплопідведенню тривалість сушіння складає декілька хвилин в залежності від властивостей продукту. Висушений продукт у вигляді пластівців чи стрічки знімається з барабана за допомогою скребкового пристрою. Описаний спосіб використовується для сушіння картопляного пюре [2; 3], фруктового пюре, зокрема яблучного [4]. Недоліком вальцової сушарки є використання пари як теплоносія та непродуктивні втрати енергії на нагрівання вільної поверхні барабана. Частково ці недоліки усунуті авторами [5], що запропонували нову конструкцію завантажувального пристрою та скребкового ножа і встановили вентилятор для охолодження поверхні барабана.

Широке розповсюдження також отримав конвективний спосіб сушіння, який реалізується на конвеєрних, вихрових та розпилювальних сушарках, а також сушарках із псевдозрідженим і віброкиплячим шаром. Конвеєрні сушарки мають металевий чи дерев'яний корпус, в якому розміщені один над одним декілька конвеєрних транспортерів, сітчасті стрічки яких виконані з антикорозійної сталі [2; 3]. Перед сушінням на конвеєрних сушарках із пастоподібного продукту формують циліндричні гранули (для виробництва картопляних гранул – діаметр до 3 мм, довжина до 30 мм). Підігрів повітря у сушарці здійснюють парою за допомогою ребристих калориферів, встановлених під кожною стрічкою (в деяких модулях встановлені вентилятори для видалення вологи), або за допомогою електричних калориферів, які продуваються повітрям за допомогою вентиляторів. У процесі руху сировину ворухать спеціальними пристроями, які сприяють механізації процесу сушіння, регулюванню основних оптимальних для різних видів сировини параметрів процесу з отриманням продукції високої якості. Недоліком цих сушарок є громізка конструкція, незначна продуктивність, неоднорідний за якістю продукт та великі втрати теплоти з відпрацьованим повітрям.

В останні роки для сушіння харчових продуктів найбільш перспективними вважаються способи сушіння, що застосовують мікрохвильове та інфрачервоне теплопідведення. Вони мають ряд переваг над традиційними для більшості вітчизняних виробництв конвективним та кондуктивним способами теплопідведення – об'ємний характер теплопідведення, що забезпечує менші енерговитрати та кращу якість продукції; простоту експлуатації та автоматизації; можливість забезпечення вологовмісту до 1...2%;

відпадає необхідність в обладнанні для утилізації теплоти відпрацьованого повітря тощо.

Так, у роботі [6] проведені експериментальні дослідження з сушіння картопляного пюре при комбінованому кондуктивно-радіаційному теплопідведенні. Дослідження виконувались на стенді, який являє собою вальцову сушарку зі встановленим над барабаном блоком інфрачервоних випромінювачів для інтенсифікації процесу сушіння. Для дослідження використовували сорти картоплі Невський, Луговський, Андретта. Температура поверхні барабана змінювалася в межах 95...170° С. Тривалість інфрачервоного опромінення варіювали в межах 0...24 с, щільність теплового потоку – 10...50 кВт/м<sup>2</sup>. Результати досліджень показали, що при оптимальних параметрах сушіння тривалість процесу зменшена на 29%, енерговитрати – на 19%, вміст вітаміну С вище на 7...9% порівнянно з традиційним кондуктивним сушінням картоплі на вальцовій сушарці.

Ці дослідження, а також проведений огляд літературних джерел зі способів сушіння пастоподібних харчових продуктів дозволив нам обрати для сушіння пюре з відходів картопляного виробництва спосіб з радіаційним теплопідведенням. Однак, незважаючи на ефективність запропонованого авторами [6] кондуктивно-радіаційного способу сушіння картопляного пюре, у випадку сушіння з попередньо замороженого продукту утворюється значна кількість редуруючих сахарів, що підвищує адгезію (налипання) продукту на гарячу металеву поверхню. Складність відділення такого продукту від поверхні нагрівання, як показали наші експериментальні дослідження, зумовлює його низьку якість. Тому в результаті нами обраний радіаційний спосіб сушіння пюре у тонкому нерухомому шарі не на металевій, а на фторопластовій поверхні, яка забезпечує відсутність налипання продукту [7].

**Мета та завдання статті.** Метою статті є дослідження сушіння пюре з картопляних відходів з використанням радіаційного теплопідведення.

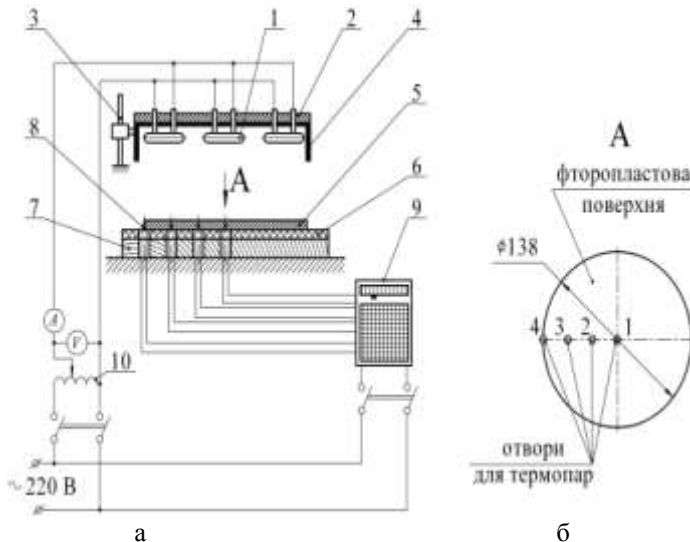
**Виклад основного матеріалу дослідження.** Дослідження обраного способу сушіння проводилися на експериментальному стенді, принципова схема якого зображена на рис. 1.

Стенд складається з наступних основних вузлів: блоку ІЧ-випромінювачів, блоку вимірювання температур, блоку електричного живлення з вимірювальними приладами, дерев'яної основи з круглою фторопластовою пластиною діаметром 138 мм.

Генератором ІЧ-випромінювання є ТЕНІ 1 у формі вісімки, розташований над дерев'яною основою 7. ТЕНІ обладнані відбивачем 4, який спрямовує на фторопластову пластину 6 з продуктом 5 теплові промені, що падають вгору. Блок ІЧ-випромінювачів змонтований на

спеціальній стійці 3, може вертикально переміщуватися і фіксуватися на різних відстанях відносно фторопластової пластини з продуктом.

Блок автоматичного запису температури складається з шеститочкового автоматичного потенціометру 9 марки КСП-4 та хромель-копельових термопар 8. Температура у різних точках продукту визначалась за допомогою хромель-копельових термопар і фіксувалася на діаграмній стрічці потенціометра КСП-4. Термопари виготовлені із дроту діаметром  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м. Схема встановлення термопар наведена на рис. 1, б. Для встановлення термопар у дерев'яній основі 7 та фторопластовій пластині 6 рівномірно від центра вздовж радіуса виконані чотири концентричні отвори.



**Рисунок 1 – Принципова схема експериментального стенда для дослідження сушіння пюреподібних продуктів (а) та схема встановлення термопар (б): 1 – ТЕН; 2 – теплоізоляція; 3 – стійка; 4 – відбивач; 5 – продукт; 6 – фторопластова пластинка; 7 – дерев'яна основа; 8 – термопара; 9 – потенціометр; 10 – автотрансформатор**

Величина опромінення змінювалася за допомогою автотрансформатора 10 і варіювання відстані між блоком ІЧ-випромінювачів та пластинкою з продуктом.

Як продукт досліджували відходи від переробки картоплі, попередньо подрібнені у пюре, заморожені та розморожені до кімнатної температури.

Досліди проводили в наступній послідовності. На експериментальному стенді встановлювалася визначена величина

щільності теплового потоку за рахунок регулювання автотрансформатором напруження живлення блоку ТЕНів або зміни його висоти. Установка виходила на сталий режим роботи протягом 15-20 хв. Після цього пластина з рівномірно нанесеним продуктом кімнатної температури встановлювалася на дерев'яній основі, як показано на рис. 1.

Досліджувалися зміна вологовмісту продукту та його температурне поле, причому ці досліди проводилися окремо. Для визначення зміни вологовмісту з інтервалом в одну хвилину пластина з продуктом зважувалася на аналітичних електронних терезах SNUG II-300 з точністю 0,01 г. Кожен дослід проводився до припинення зміни маси пластини з продуктом. За методом висушування до постійної маси відповідно до ГОСТ 15113.4-77 визначався вологовміст продукту до і після сушіння. При цьому бюкси з подрібненим продуктом досушувались у сушильній шафі СНОЛ 3,5.3,5.3.5/3,5 І2, що обладнана автоматичним регулятором температури, при її значенні  $130 \pm 2^\circ \text{C}$ . Дослідження температурного поля продукту проводили без періодичного зважування при встановлених термopарах, як показано на схемі рис. 1, б. Усі досліди проводили тричі, результати усереднювалися.

На підставі експериментальних даних побудовані криві сушіння, швидкості сушіння та температури у різних точках продукту.

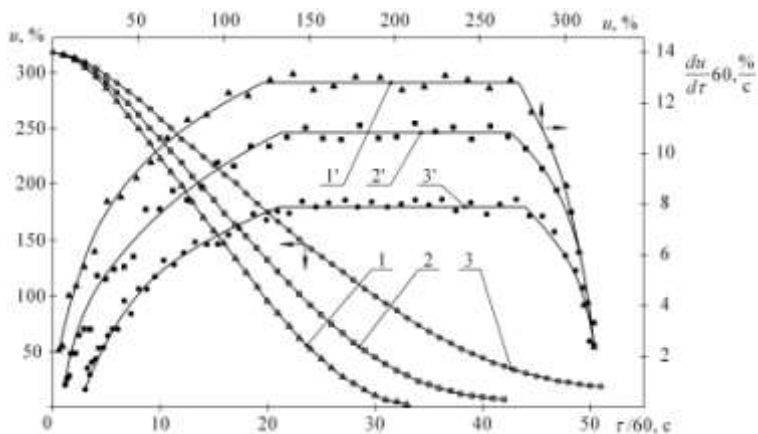
На рис. 2 наведено криві сушіння та швидкості сушіння поре з картопляних відходів при різних значеннях щільності теплового потоку ІЧ-випромінювання.

Досліди проводили при температурі повітря у приміщенні  $19\text{--}21^\circ \text{C}$ , початковому вологовмісту продукту 317%, питомому навантаженню продукту на фторопластову пластину  $2,33 \text{ кг/м}^2$ .

Криві швидкості сушіння побудовані шляхом графічного диференціювання кривих сушіння.

Аналіз кривих показує, що процес сушіння проходить у три періоди – прогрівання (невеличка опукла до верхньої горизонтальної осі ділянка на початку кривих) лінійної зміни вологовмісту та спадаючої швидкості сушіння. Значення критичного вологовмісту, що розділяє другий та третій періоди, лежить в межах 122,1...132,9% залежно від щільності теплового потоку ІЧ-випромінювання. Найбільш тривалою на кривих сушіння є ділянка лінійної зміни вологовмісту, під час якої, разом із ділянкою прогрівання, видаляється здебільшого вільна волога. Форма кривих швидкості сушіння на останній ділянці характерна для колоїдних матеріалів і свідчить про те, що внаслідок подрібнення картопляних відходів до пореподібного стану і заморожування відбулося руйнування більшості макро- і мікрокапілярів продукту, і зв'язана волога складається з адсорбційної і осмотичної.

Як показують криві рис. 2, інтенсивність сушіння значно залежить від щільності теплового потоку. Так, при підвищенні її з 876 до 1625 Вт/м<sup>2</sup> тривалість процесу зменшується відповідно з 51 до 33 хв. Прискорення сушіння при цьому відбувається здебільшого у періоді лінійної зміни вологовмісту. Так, постійна швидкість сушіння у цьому періоді підвищується, відповідно, з 7,92 до 12,8%/хв.



**Рисунок 2 – Криві сушіння (1-3) та швидкості сушіння (1'-3') пюре з картопляних відходів при різних значеннях щільності теплового потоку ІЧ-випромінювання: 1, 1' – 1625 Вт/м<sup>2</sup>; 2, 2' – 1250 Вт/м<sup>2</sup>; 3, 3' – 875 Вт/м<sup>2</sup>**

З урахуванням того, що така інтенсифікація процесу досягнута за рахунок зменшення висоти розташування блоку ТЕНів з 0,096 до 0,051 м при однакових значеннях потужності електричного живлення, очевидним є зменшення при цьому питомих енерговитрат та збільшення продуктивності установки пропорційно зменшенню тривалості процесу сушіння. Тобто, з позицій вищевказаних показників оптимальною є найменш можлива з технічних міркувань відстань між блоком ТЕНів та продуктом.

Інший характер впливу має підвищення щільності теплового потоку на якість продукту. Так, при щільності 875 Вт/м<sup>2</sup> готовий продукт має рівномірний кремовий колір, відсутні зони підгоряння продукту. При щільності 1250 Вт/м<sup>2</sup> на периферії шару продукту з'являється кільцева зона шириною біля 15 мм з більш темним кольором. Ще більших розмірів набуває ця зона при 1625 Вт/м<sup>2</sup>. Це свідчить про неоднорідність щільності теплового потоку для даної експериментальної установки у горизонтальних площинах. Ця неоднорідність, судячи зі збільшення зони підгоряння при зменшенні відстані між продуктом і блоком ТЕНів, змінюється також у вертикальному напрямі.

У всіх дослідах продукт відділявся від фторопластової поверхні самостійно під час сушіння, навіть при утворенні зони підгорання.

Для апроксимації кривих швидкості сушіння у періоді спадаючої швидкості (рис. 2) був розглянутий ряд математичних моделей. Найкращі результати були отримані при апроксимації наступним рівнянням [8]:

$$\frac{du}{d\tau} = \chi' N (u_p - u)^n, \quad (1)$$

де  $du/d\tau$  – швидкість сушіння;  $u$  – поточний вологовміст;  $u_p$  – рівноважних вологовміст;  $N$  – швидкість сушіння у період лінійного видалення вологи;  $\chi'$  – відносний коефіцієнт сушіння;  $n$  – коефіцієнт, що характеризує властивості продукту.

Обробка експериментальних результатів проводилася за допомогою метода найменших квадратів у комп'ютерному пакеті MathCAD. Результати статистичної обробки наведені у табл.

*Таблиця – Дані апроксимації кривих швидкості сушіння*

Показник	Дані		
Щільність теплового потоку, кВт/м <sup>2</sup>	1625	1250	875
$\chi'$	0,143	0,092	0,124
$n$	0,413	0,5	0,435
Коефіцієнт кореляції	0,990	0,990	0,982

З рівняння (1) за допомогою інтегрування отримаємо формулу для розрахунку тривалості сушіння до кінцевого вологовмісту  $u_k$ :

$$\tau = \frac{u_{kp} - u_p}{\chi' N (1-n)} \left( \frac{1-n}{u_p - u_k} - \frac{1-n}{u_p - u_0} \right) + \frac{u_0 - u_{kp}}{N}, \quad (2)$$

де  $u_{kp}$  – критичний вологовміст, що розділяє періоди постійної і спадаючої швидкості сушіння.

#### **Висновки:**

- на процес сушіння картопляного пюре при радіаційному теплопідведенні суттєво впливає рівномірність теплового потоку, яка визначається формою джерел інфрачервоного випромінювання та відбивачів, а також відстанню від них до продукту;

- застосування фторопластової поверхні, на якій розташовується продукт під час сушіння, забезпечує легке його відділення, що є проблемою при кондуктивному теплопідведенні;

- отримані експериментальні дані оброблені за допомогою теорії сушіння та методів математичної статистики у комп'ютерному пакеті Mathcad, що в результаті дає змогу визначити для дослідженого діапазону щільності теплового потоку інфрачервоного опромінення

тривалість сушіння до визначеного кінцевого вологовмісту та використати ці дані при проектуванні промислової сушильної установки.

#### *Список літератури*

1. Вторичные материальные ресурсы пищевой промышленности: справочник. – М. : Экономика, 1984. – 328 с.
2. Сушеные овощи и фрукты : монография / В. А. Воскобойников [и др.]. – М. : Пищевая пром-сть, 1980. – 190 с.
3. Кац З. А. Производство сушеных овощей, картофеля и плодов : монография / З. А. Кац. – М. : Пищевая пром-сть, 1976. – 198 с.
4. Пат. 3204141 ФРГ, МКИ А 23 L 1/212. Verfahren sur Herstellung von schnellloslichem keimarmem Gemusepulver / Braeutigam Frank (ФРГ). – № Р 3204141.1 ; заявл. 6.02.82 ; опубл. 18.08.83. – 2 с.
5. Пат. 24915 Україна, МПК (2007) F 26B 17 / 28. Сушарка для пюреподібних матеріалів / Поперечний А. М., Варваріна Н. М., Сич М. І.; заявник і патенто власник Донецьк. нац. ун-т екон. і торг. ім. М. Туган-Барановського. – заявл. 11.12.2006 ; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11. – 4 с.
6. Волончук С. К. Энергосберегающие технологии переработки растительного сырья / С. К. Волончук, А. Н. Сапожников, Л. П. Шорникова // Ползуновский вестник. – Барнаул : АлтГТУ, 2011. – Вып. 2/1. – С.166–171.
7. Ларионов Б. А. Экспериментальная установка для диспергирования и сушки картофельного пюре / Б. А. Ларионов, Б. Л. Шапиро // Консервная и овощесушильная промышленность. – М. : Пищевая пром-сть, 1979. – С. 30–32.
8. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.

Отримано 30.03.2012. ХДУХТ, Харків.

© А.М. Поперечний, І.В. Жданов, С.Ю. Попова, 2012.

УДК 663.5: 637.523

**В.Г. Топольник**, д-р техн. наук (*ДонНУЕТ, Донецьк*)

**Н.М. Стукальська** (*ДонНУЕТ, Донецьк*)

**О.В. Кузьмін**, канд. техн. наук (*ДонНУЕТ, Донецьк*)

### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ БІЛОГО М'ЯСА КУРЯТИНИ (ФІЛЕ)**

*Наведено дані математичного моделювання процесу подрібнення білого м'яса курятини (філе) з метою покращення якісних характеристик отриманого фаршу.*

*Приведены данные математического моделирования процесса измельчения белого мяса курятины (филе) с целью улучшения качественных характеристик полученного фарша.*