

## РОЗРОБКА ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО СУШИЛЬНОГО АПАРАТА ТЕПЛОМАСООБМІНУ

**М.І. Погожих, С.О. Іштван**

*Подано результати розробки та конструювання вимірювального сушильного апарата процесів тепло- та масообміну із застосуванням фізико-математичної моделі. Під час дослідження зразків використано диференційний підхід, за яким еталонний зразок порівняння наявний як в експерименті, так і в підрахунках. Такий підхід дає змогу, поєднавши експериментальну частину з теоретичними підрахунками, визначити теплофізичні параметри невідомого зразка.*

***Ключові слова:** диференційний метод, тепломасообмінний процес, сушіння харчової сировини, двоканальна сушарка.*

## РАЗРАБОТКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СУШИЛЬНОГО АППАРАТА ТЕПЛОМАСОБМЕНА

**Н.И. Погожих, Е.А. Иштван**

*Представлены результаты разработки и конструирования измерительного сушильного аппарата для тепломассообменных процессов с применением физико-математической модели. При исследовании образцов используется дифференциальный подход, при котором как в эксперименте, так и в теоретических расчетах используется образец сравнения с известными теплофизическими характеристиками.*

***Ключевые слова:** дифференциальный метод, тепломассообменный процесс, сушение пищевого сырья, двухканальная сушилка.*

## DEVELOPMENT OF A DIFFERENTIAL MEASUREMENT DRYING APPARATUS

**N. Pogozhikh, I. Ishtvan**

*Energy efficiency is an important feature of modern industry. The process of drying is widespread in the food industry and consumes a lot of energy. The process of drying is accompanied by heat and mass transfer. Important characteristics of the raw material are: heat capacity, thermal diffusivity, thermal conductivity, and others. Energy efficiency requires qualitative and thorough calculations. Thus, the mathematical physics can help in the studies.*

*During the drying developed a device that allows to determine the thermal properties of the sample. Measurement technique is based on obtaining the differential temperature data with the standard and the test sample. We construct a model of mathematical physics. Obtain the equation dependent physical characteristics of the two samples. Equation substituted experimental data. The result is a thermal characteristics of the studied sample. Through the use of this device, possible operational analysis of thermal parameters of the studied sample. This are aproved to be promising. Modern developments devices with greater energy efficiency require high-quality calculations of mathematical physics. Thus, the differential method has good prospects for use. Modern development of energy efficiency equipment requires a quality of theoretical studies.*

**Keywords:** *differential methods, drying, energy efficiency, mathematical physics, food processing industry.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Енерго-ефективність процесу сушіння та якості сушильної продукції значною мірою визначається організацією та умовами реалізації тепломасообміну. При цьому важливими фізичними властивостями та характеристиками сировини є такі: теплоємність, теплопровідність, температуропровідність, коефіцієнт випаровування, густина та інші.

Значну роль у розробці процесів тепломасопереносу, зокрема сушіння харчової сировини, відіграли такі вчені: А.В. Ликов, А.С. Гінзбург, Г.К. Філоненко, В.С. Сажин, Б.І. Вербицький, В.А. Воскобойніков, Ю. Слоц, А. Ількнур, С. Рафи, А. Сеноусі, Е. Думолін та інші. Ці вчені розвинули наукові основи теорії тепломасообміну харчової сировини та отримали велику кількість експериментальних даних, які дозволяють наблизитися до реалізації на практиці уявлення про енергоефективність процесів сушіння та високої якості сушильної продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні досягнення вимірювальної техніки відкривають можливості обробки значної кількості експериментальних чи комп'ютерних даних у автоматичному режимі [1–4]. Під час сушіння виникає необхідність у вимірюванні таких величин, як температура в різних частинах установки, маса, тиск, механічні напруги та інші [5]. Проведення одночасного визначення цих величин прямими методами вимірювання викликає значні труднощі. Спираючись на це, сучасні вчені приділяють значну увагу розвиненню методів непрямих вимірювань. Одними з основних параметрів процесу сушіння є температура середовища та градієнт температури в зразку, яких зневоднюється. Слід зазначити, що необхідно враховувати спряженість щонайменше двох процесів – тепло- та масообміну.

**Мета статті** – застосувати фізико-математичну модель для створення вимірювального сушильного апарата процесів тепло- та масообміну.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

*1. Методологія вимірювання.* Як метод вимірювання використовуємо диференційний метод вимірювання. Диференційним методом вимірювання називають такий метод, у якому вимірювальна величина порівнюється з однорідною величиною, яка має відоме значення, несуттєво відрізняється від вимірювальної величини. У цьому методі враховується різниця між обома значеннями [1].

У ході проведення експерименту проводилось дослідження динаміки температури на границях та в об'ємі зразку. Місця визначення температури обрані таким чином, щоб урахувати необхідність сформулювати початково-краєву задачу теплопровідності повністю.

Математично-фізична теорія теплопровідності є одним із головних напрямів дослідження явищ теплообміну. У літературних джерелах, присвячених питанням теорії теплопровідності, широко представлено основні положення цієї теорії, обґрунтування механізмів передачі теплоти в тілах різної геометричної форми та фазового стану, методи математичного моделювання процесів теплообміну [6–8].

Характер динаміки температури визначає методи описання теплофізичних характеристик, які бувають стаціонарні та нестаціонарні. Ми використовуємо стаціонарні методи вимірювання, якщо тепловий потік, який проходить крізь матеріал, залишається постійним у часі, лишаючи розподіл температур стаціонарним. Досягнення стаціонарного розподілу температур є довготривалим процесом. Тривалість нестаціонарних методів досліджень ТФХ незначна, процес відбувається за умови незначних перепадів температури вздовж товщини матеріалу, хоча й вимагає більш складної апаратури.

У свою чергу, нестаціонарні методи досліджень поділяються на методи початкової стадії теплообміну (чисто нестаціонарні), та методи регулярного режиму (квазістаціонарні) [2; 3; 8].

Визначення теплофізичних характеристик базується на розв'язанні диференціального рівняння теплопровідності для температури ( $t$ ) та густини теплового потоку ( $q$ ) на поверхнях плоского зразка в умовах регулярного режиму другого роду [8].

*2. Експериментальна установка.* Експериментальна установка є конвективною сушаркою з розподілом потоку повітря на два канали

порівняння – еталона та зразка з невідомими теплофізичними характеристиками. Потужність потоку повітря та нагрівачих тенів регулюється блоком живлення та ЛАТРОм. Контроль температури проводиться на вході та виході боксу з кюветами та в зразку. Термопары розташовані таким чином, щоб виконувати контроль у кожному з каналів сушарки та в різних зонах зразка, даючи необхідну інформацію для складання та рішення задачі теплообміну.

3. *Проведення підрахунків.* Для ілюстрації принципу диференціального вимірювання та розрахунку розглянуто просту задачу з використанням диференційного методу. Сформулюємо задачу лінійного теплообміну, припускаючи відсутність поперечного градієнта температури та відповідно теплообміну в поперечному розрізі;

$$c\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial U}{\partial x}.$$

Ураховуючи, що

$$U(x, 0) = \varphi(x), \quad 0 \leq x \leq 1$$

$$U(0, t) = 0,$$

$$U(1, t) = 0,$$

$$0 \leq t \leq \infty,$$

де  $\lambda$  (іноді позначають  $k$ ) – коефіцієнт теплопровідності;  $c$  – питома теплоємність;  $\rho$  – густина речовини.

Використовуючи метод Фур'є, отримуємо розв'язок:

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-a^2 \frac{\pi n}{l} t} \sin \frac{\pi n}{l} x.$$

Для випадку однорідної початкової умови ( $\varphi(\xi) = \text{const} \neq \xi$ ), спростимо коефіцієнт  $C_n$ :

$$C_n = \frac{2\varphi}{l} \int_0^l \sin\left(\frac{\pi n}{l} \xi\right) d\left(\frac{\pi n}{l} \xi\right) = \frac{1}{\pi n} (1 - \cos \pi n).$$

Таким чином, розв'язок має вигляд:

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\varphi}{\pi n} (1 - \cos \pi n) e^{-a^2 \frac{\pi n}{l} t} \sin \frac{\pi n}{l} x.$$

Отримавши значення, перейдемо до диференційного методу. Ми маємо два розв'язки, для двох зразків, які розміщені в середовищі за однакових зовнішніх умов, у тому числі початкових ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ).

Запишемо ці розв'язки та з метою вираження теплофізичних характеристик досліджуваного зразка через характеристики еталона, візьмемо їх відношення:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} (1 - \cos \pi n) e^{-\frac{a^2 \pi n t}{l} \sin \frac{\pi n}{l}}}{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} (1 - \cos \pi k) e^{-\frac{a^2 \pi k t}{l} \sin \frac{\pi k}{l}}}.$$

Уразі розкладання функцій у ряд Тейлора виникає необхідність оцінити збіжність ряду, для цього беремо експериментальні дані для двох типів ковбас із великою розбіжністю коефіцієнтів температуропровідності ( $a_1 = 13 \cdot 10^{-8} \text{ (м}^2/\text{с)}$ ) та  $a_2 = 21,1 \cdot 10^{-8} \text{ (м}^2/\text{с)}$ ), таким чином отримане співвідношення є збіжним. Беремо перший ряд розкладання та, шукаючи рішення для точки  $x_1 = x_2 = 0,9l$ , отримуємо:

$$\frac{U_1}{U_2} = e^{a_2^2 t_2 - a_1^2 t_1}.$$

Значення температур у обраних точках тіла та час знаходимо експериментально, теплофізичні характеристики еталонного тіла відомі, таким чином, ми отримали рівняння в точці з однією невідомою. Це рівняння легко розв'язується в програмних пакетах інженерних підрахунків (наприклад, Mathcad чи Lab).

**Висновки.** Розвинуто методологію пошуку енергоефективних способів сушіння харчової сировини.

1. Доведено, що використання умов  $T = \text{const}$  для фізико-математичної моделі процесу тепломасообміну за прямого вимірювання температури контрольного та дослідного зразків, дозволяє знаходити необхідні теплофізичні властивості дослідного зразка.

2. Розроблено лабораторну вимірювальну установку та проведено її випробування. Отримані експериментальні дані достатньо корелюють із теорією, дозволяючи досягти поставленої мети.

## Список джерел інформації / References

1. Пронкин Н. С. Основы метрологии : практикум по метрологии и измерениям / Н. С. Пронин. – М. : Логос, 2007. – 392 с.  
Pronkin, N.S. (2007), *Fundamentals of metrology: workshop on Metrology and Measurements [Osnovy metrologii: praktikum po metrologii i izmerenijam]*, Logos, Moscow, 392 p.
2. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности. Т.1. Методология / Ю. М. Мацевитый. – Киев : Наук. думка, 2002. – 405 с.  
Macevityj, Ju.M. (2002), *Inverse heat conduction problems: p. 1. Metodologija [Obratnye zadachi teploprovodnosti]*, Nauk. Dumka, Kiev, 405 p.
3. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности. Т. 2. Приложения / Ю. М. Мацевитый. – Киев : Наук. думка, 2003. – 392 с.  
Macevityj, Ju.M. (2002), *Inverse heat conduction problems: p. 2 Apps [Obratnye zadachi teploprovodnosti]*, Nauk. Dumka, Kiev, 392 p.
4. Мацевитый Ю. М. Гибридное моделирование тепловых процессов / Ю. М. Мацевитый, Й. Кунеш. – Киев : Наук. думка, 1987. – 268 с.  
Macevityj, Ju.M., Kunesh J. (1987), *Hybrid modeling of thermal processes [Gibridnoe modelirovanie teplovyh processov]*, Nauk. Dumka, Kiev, 268 p.
5. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 471 с.  
Lykov, A.V. (1968), *Theory of drying [Teoryya sushky]*, Jenergiya, Moscow, 471 p.
6. Михайленко В. Є. Геометричне моделювання променевого теплообміну для оптимізації конструкцій ІЧ-установок харчової промисловості. Геометричне та комп'ютерне моделювання / В. Є. Михайленко, О. І. Черевко, Ю. М. Тормосов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / ХДУХТ. –Харків, 2002. – Вип. 1 (5). – С. 6–11.  
Mykhaylenko, V.Ye., Cherevko, O.I., Tormosov, Yu.M. (2002), "Geometric modeling of radiation heat transfer to structural optimization of IR systems Food Industry. Geometric and Computational Simulation", *Progressive techniques and technologies of food production in the restaurant industry and trade* ["Неометричне моделювання променевого теплообміну для оптимізаційної конструкції ІЧ-установок харчової промисловості. Неометричне та комп'ютерне моделювання", *Progresyivna tehnika ta tehnologii' harchovyh vyrobnyctv restoranного gospodarstva i torgivli*], Issue 1 (5), Kharkov, pp. 6–11.
7. Беляев М. И. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов : монография / М. И. Беляев, П. Л. Пахомов. – Х. : ХИОП, 1991. – 160 с.  
Beljaev, M.I., Pahomov, P.L. (1991), *Theoretical basis of the combined methods of heat treatment of foodstuffs : [Teoreticheskie osnovy kombinirovannyh sposobov teplovoj obrabotki pishhevyyh produktov]*, ХИОП, Kh., 160 p.
8. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса / П. Г. Круковский. – К. : НАНУ Институт технической теплофизики, 1998. – 224 с.

Krukovskij, P.G. (1998), *Inverse problems of heat and mass transfer [Obratnye zadachi teplomassoperenosa]*, NANU Institut tehnichej teplofiziki, K., 224 p.

**Погожих Микола Іванович**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри енергетики та фізики, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-86; e-mail: drpogozhikh@mail.ru.

**Погожих Николай Иванович**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедры энергетики и физики, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-86; e-mail: drpogozhikh@mail.ru.

**Pogozhikh Nikolay**, PhD, associate professor, head of department of energetics and physics, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska st., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-86; e-mail: drpogozhikh@mail.ru.

**Иштван Егор Олексійович**, асист., кафедра енергетики та фізики, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-00; e-mail: egor\_ishtvan@mail.ru.

**Иштван Егор Алексеевич**, ассист., кафедра энергетики и физики, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-00; e-mail: egor\_ishtvan@mail.ru.

**Ishtvan Iegor**, assistant, department of energetics and physics, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska st., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (066)349-45-00; e-mail: egor\_ishtvan@mail.ru.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук В.М. Михайловим.  
Отримано 1.08.2014. ХДУХТ, Харків.*

УДК 641.528.6

## ОБҐРУНТУВАННЯ УМОВ ШВИДКОГО ЗАМОРОЖУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

**В.О. Потапов, Д.П. Семенюк**

*Запропоновано методику технологічного розрахунку тривалості швидкого заморожування, яка повинна складатися з двох етапів. На першому визначають умови, за яких можливе швидке заморожування, тобто*