

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

*VII Міжнародної науково-практичної  
конференції*

**«ІННОВАЦІЙНІ  
ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ»**

*9-13 вересня 2019 р.*



ОДЕСА  
2019

Публікуються доповіді, представлені на XVIII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (9 – 13 вересня 2019 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

Доктор техн. наук, професор  
Кандидат техн. наук

О.Г. Бурдо  
Ю.О. Левтринська  
Я.О. Масельська

## МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

- |  |  |
|--|--|
| <b>Єгоров</b><br><i>Богдан Вікторович</i>        | – голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор                                       |
| <b>Бурдо</b><br><i>Олег Григорович</i>           | – вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор                                      |
| <b>Атаманюк</b><br><i>Володимир Михайлович</i>   | – Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор   |
| <b>Васильєв</b><br><i>Леонард Леонідович</i>     | – Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н., професор                                      |
| <b>Гавва</b><br><i>Олександр Миколайович</i>     | – Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор   |
| <b>Гумницький</b><br><i>Ярослав Михайлович</i>   | – Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор   |
| <b>Долинський</b><br><i>Анатолій Андрійович</i>  | – Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАН України  |
| <b>Зав’ялов</b><br><i>Владимир Леонідович</i>    | – Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор   |
| <b>Сукманов</b><br><i>Валерій Олександрович</i>  | – Полтавський університет економіки і торгівлі, д.т.н., професор   |
| <b>Колтун</b><br><i>Павло Семенович</i>          | – Technident Pty. Ltd., Australia, Dr  |
| <b>Корнієнко</b><br><i>Ярослав Микитович</i>     | – Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор                          |
| <b>Малежик</b><br><i>Іван Федорович</i>          | – Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор   |
| <b>Михайлов</b><br><i>Валерій Михайлович</i>     | – Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н., професор   |
| <b>Паламарчук</b><br><i>Ігор Павлович</i>        | – Національний університет біоресурсів та природокористування України, д.т.н., професор                                    |
| <b>Снежкін</b><br><i>Юрій Федорович</i>          | – Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., академік. НАН України  |
| <b>Сорока</b><br><i>Петро Гнатович</i>           | – Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор  |
| <b>Сухий</b><br><i>Константин Михайлович</i>     | – ДВНЗ "Український державний хіміко-технологічний університет", д.хім.н., професор  |
| <b>Тасімов</b><br><i>Юрій Миколайович</i>        | – Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України  |
| <b>Товажнянський</b><br><i>Леонід Леонідович</i> | – Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України |
| <b>Ткаченко</b><br><i>Станіслав Йосифович</i>    | – Вінницький національний технічний університет, д.т.н., професор  |
| <b>Черевко</b><br><i>Олександр Іванович</i>      | – Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н., професор                                       |
| <b>Шит</b><br><i>Михайл Львович</i>              | – Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с   |

---

**СЕКЦІЯ 1.**

**ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ  
ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

---

УДК 641.53.094: 637.5.034

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ ПРИ КОНВЕКТИВНОМУ СУШІННІ М'ЯСНИХ ВИРОБІВ

Ощипок І. М., д-р техн. наук, професор  
Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів

## MODEL OF WARM MASS TRANSFER PROCESS FOR CONVECTIONAL DRYING MEAT PRODUCTS

Oshchypok I.M. Dr. Sciences, Professor  
Lviv trade and economic University, Lviv

**Анотація.** У статті розглянута модель розв'язання актуального завдання у сфері техніки й технології сушіння м'ясних виробів, яка пов'язана з факторами вивчення і поглиблення уяви про фізичну сутність і закономірність переносу енергії й речовини при різних методах сушіння для створення науково обґрунтованої методики техніко-економічної оцінки сушильних установок при сушінні м'ясних виробів. Питання математичного моделювання процесу сушіння поверхневої вологи з виробів після відповідної технологічної обробки є актуальним, так як визначає терміни тривалого зберігання. Задача випаровування рідини з поверхні капілярно-пористого тіла розглянута в трьох аспектах, а загальна задача моделювання процесів тепломасопереносу при конвективному сушінні м'ясних продуктів з додатковим підведенням ІЧ енергії, розглянута в двох складових. Перша коли математична модель описує період умовно постійної швидкості висушування і пов'язана з винесенням вільної вологи з поверхні виробу до досягнення нею повітряно-сухого рівноважного стану. Друга коли описує період з спадною швидкістю сушіння, коли фронт випаровування вологи проникає всередину продукту. Записані диференціальні рівняння переносу для теплоносія при обтіканні поверхні виробу потоком в граничному шарі при розгляді градієнтів швидкості, температури і вмісту вологи. Розглянутий період спадної швидкості сушіння, коли фронт випаровування проникає всередину матеріалу. Були проведені експериментальні дослідження і після їх обробки отримали деякі критеріальні рівняння для опису процесу сушіння м'ясних виробів.

**Abstract.** The article considers the model of the solution of the actual problem in the field of technics and technology of drying meat products, which is associated with the factors of studying and deepening the idea of the physical nature and the pattern of energy transfer and substance transfer under different drying methods for the creation of scientifically substantiated method of technical and economic assessment drying facilities for drying meat products .. The mathematical modeling of the process of drying the surface moisture from the products after the appropriate technological treatment is relevant, since it defines the terms of long storage time. The problem of evaporation of the liquid from the surface of the capillary-porous body is considered in three aspects, and the general task of modeling the processes of heat and mass transfer with convective drying of meat products with additional inflammation of infrared energy is considered in two components. The first one when the mathematical model describes the period of a conditionally constant drying rate and is associated with the removal of free moisture from the product surface until it reaches the air-dry equilibrium state. The second one describes a period with a decreasing drying rate, when the moisture evaporation front enters the product. The differential transport equations for the coolant are recorded at the flow of the surface of the product by flow in the boundary layer when considering the gradients of velocity, temperature and moisture content. Considered the period of decreasing drying rate, when the front of evaporation penetrates into the material. Experimental studies were carried out and after their processing, some criterion equations were obtained for describing the process of drying meat products.

**Ключові слова:** модель, сушіння, тепломасоперенос, конвективний, м'ясні, вироби  
**Keywords:** model, drying, warm mass transfer, convective, meat products

**Постановка проблеми в загальному вигляді та зв'язок із найважливішими науковими чи практичними завданнями.** Одним з розповсюджених методів збереження й переробки сільськогосподарської сировини є сушіння. У зв'язку з цим виникає необхідність удосконалення способів сушіння м'ясних виробів, що забезпечують високу якість готового продукту, створення умов для більш повної переробки сировини, зменшення втрат, автоматизацію, механізацію й значну інтенсифікацію цього процесу, а також зниження питомих енерговитрат. Рішення актуальних завдань у сфері техніки й технології сушіння безпосередньо пов'язують з наступними факторами: вивченням і поглибленням уяви про фізичну сутність і закономірність переносу енергії й речовини при різних методах сушіння; подальшим вивченням властивостей матеріалу, як об'єкта сушіння; застосуванням новітніх фізико-хімічних методів дослідження, обґрунтуванням методів управління механізмом переносу вологи всередині матеріалу у процесах сушіння; створенням науково обґрунтованої методики техніко-економічної оцінки сушильних установок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сушіння вологих матеріалів – це складний термо- і масодифузійний процес. Для складних багатокомпонентних систем, якими є м'ясні вироби, процес сушіння представляється у вигляді двох складових: теплофізичної й технологічної. Якщо теплофізичний процес сушіння визначає «чисте» переміщення тепла й вологи крізь товщу продукту, то технологічний являє собою сукупність процесів переміщення вологи й тепла, що супроводжуються хімічними, біохімічними й структурно-механічними змінами. Дослідження на які опирається автор викладені в роботах [1-6].

**Постановка завдання.** Питання математичного моделювання процесу сушіння поверхневої вологи з виробів після відповідної технологічної обробки є актуальним, так як визначає терміни тривалого зберігання. Загальну задачу моделювання процесів тепломасопереносу при конвективному сушінні продуктів з додатковим підведенням інфрачервоної (ІЧ) енергії, розглянемо в двох складових. Перша коли математична модель описує період умовно постійної швидкості висушування і пов'язана з винесенням вільної вологи з поверхні виробу до досягнення нею повітряно-сухого рівноважного стану. Друга коли описує період з спадною швидкістю сушіння, коли фронт випаровування вологи проникає всередину продукту.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Поверхня тіла покрита суцільним шаром вологи (зовнішня задача). В цьому випадку процес масопереносу аналогічний випаровуванню з вільної поверхні рідини. При додатковому підведенні ІЧ-енергії швидкість масопереносу не залишається постійною, як в класичному випадку, а зростає пропорційно величині поглинання потужності ІЧ-випромінювання. У зв'язку з цим, даний період будемо розглядати як період умовно постійної швидкості висушування. Випаровування в окремих місцях при якому процес масопереносу відбувається частково, але з вільної змоченої поверхні, а частково з висушеної, коли рівень рідини в капілярах збігається з видимою геометричною поверхнею виробу. Поверхня випаровування переміщається всередину, в глибину матеріалу з утворенням прошарку, що представляє собою додатковий опір переносу теплоти і речовини з середини продукту (внутрішня задача). Такий підхід найбільш прийнятний, так як в масі виробу, під час обробки мають місце ділянки, які обробляють в режимі як першого, так і другого періоду одночасно [4,6].

В якості моделі одиничного виробу приймемо площину діаметром  $D$  і товщиною  $2R$ . Вісь  $X$  орієнтована уздовж поверхні, а  $Z$  перпендикулярна поверхні виробу. Початком координатної системи вибрано вісь симетрії поперечного перерізу виробу. В період умовно постійної швидкості сушіння вологий матеріал-виріб містить як зв'язану (гігроскопічну), так і вільну вологу і тому буде вважатись мокрим або сирим матеріалом. В цьому випадку завдання сушіння зводиться до зовнішньої задачі - тобто до видалення вільної вологи. При обтіканні поверхні виробу потоком теплоносія, в граничному шарі виникають градієнти швидкості, температури і вмісту вологи. Диференціальні рівняння переносу для теплоносія можуть бути записані в наступному вигляді [5,6].

Рівняння переносу маси:

$$\frac{\partial U_T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial v_T}{\partial x} + V_z \frac{\partial v_T}{\partial z} = a_m^T \left( \frac{\partial^2 U_T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U_T}{\partial x^2} \right) + a_m^T d_T \left( \frac{\partial^2 t_T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t_T}{\partial x^2} \right), \quad (1)$$

$U_T = \frac{G_{ae}}{G_c}$  - питомий вміст вологи теплоносія;

$V_x$  - поздовжня швидкість обтікання виробу, м/с;

$x$  - поздовжня координата, м;

$z$  - поперечна координата, нормальна до поверхні виробу, м;

$V_z$  - компонента швидкості, нормальна до поверхні виробу, м/с;

$m$  - коефіцієнт масопровідності (дифузії), м<sup>2</sup>/с;

$d_T$  - термоградієнтний коефіцієнт, К<sup>-1</sup>;

$t_T$  - температура теплоносія, К;

$G_{вл}$ ,  $G_c$  - маса вологи і сухого повітря, кг.

Рівняння переносу теплоти:

$$\frac{\partial t_T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial t_T}{\partial x} + V_z \frac{\partial t_T}{\partial z} = a_T \left( \frac{\partial^2 t_T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t_T}{\partial x^2} \right) + \frac{\varepsilon \cdot r}{c_T} \frac{\partial U_T}{\partial \tau} + \frac{q}{c_T \rho_T} \quad (2)$$

де  $a_T$  - коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

$\rho_T$  - щільність теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;

$c_T$  - питома теплоємність, Дж/кг К;

$q$  - об'ємна потужність ІЧ випромінювання, Вт/м<sup>3</sup>;

$r$  - питома теплота випаровування води, Дж/кг;

$\varepsilon$  - коефіцієнт фазового переходу.

Слід зазначити, що в роботі [5] показано досить слабкий вплив фактору поперечного потоку маси на процеси тепло- і масообміну в процесах випаровування. Таким чином, в рівняннях (1) і (2) можна покласти:

$$V_z \frac{\partial U_T}{\partial z} = 0; \quad V_z \frac{\partial t_T}{\partial z} = 0.$$

У період умовно постійної швидкості сушіння (зовнішня задача) можуть бути записані рівняння збереження енергії і маси для висушуваного об'єкту.

Щільність потоку маси визначається механізмом переміщення вологи всередині матеріалу у вигляді пари або рідини (вологопровідність, термовологопровідність, бародифузія) і механізмом переміщення вологи з

поверхні матеріалу в навколишнє середовище через приграничний шар при природній або вимушеній конвекції, а так само енергетикою випаровування (питома теплота випаровування, структура, розмір і форма капілярів, енергія зв'язку вологи).

Загальний вираз для щільності потоку вологи в капілярно-пористому тілі (в напрямку осі Z) записується [5] у вигляді співвідношення:

$$J = -a_m \rho_o \nabla U - a_m^t \rho_o \nabla t - a_m^p \rho_o \nabla P$$

$\rho_o$  - щільність вологи, кг/м<sup>3</sup>;

$a_m$  - коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;

$a_m^t$  - коефіцієнт термодифузії, м<sup>2</sup>/с К;

$a_m^p$  - коефіцієнт бародифузії,

$|\nabla U| = \frac{\partial u}{\partial z}$  - градієнт вологовмісту, м<sup>-1</sup>;

$|\nabla t| = \frac{\partial t}{\partial z}$  - градієнт температури, К/м;

$|\nabla P| = \frac{\partial p}{\partial z}$  - градієнт тиску, Па/м.

При цьому необхідно мати на увазі наступні обставини:

Так, як температура теплоносія в реальних умовах становить величину меншу за 80 °С, то явищем бародифузії нехтуємо [5].

За результатами експериментальних досліджень зміна температури поверхні висушуваного зразка становить близько 7 °С, у зв'язку з чим компоненту термовологопровідності можна також опустити. У такому випадку рівняння збереження маси для зразка може бути записане у формі рівняння (1), а рівняння збереження енергії для висушуваного плоского двовимірного об'єкта, в умовах нехтування термічним опором тонкої плівки вологи, може бути записане в класичному вигляді [5]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{q}{c_p} \quad (3)$$

де  $\rho$  - щільність матеріалу виробу, кг/м<sup>3</sup>.

Для розв'язання рівнянь (1), (2), (3) тепломасопереносу в першому періоді сушіння необхідно сформулювати умови однозначності - крайові задачі.

Для нашого випадку, з урахуванням фазового переходу при випаровуванні води з вільної поверхні, граничні умови третього роду для рівнянь (1) і (2) приймуть вигляд:

$$\lambda_m \cdot \delta_T \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_i + \lambda_m \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)_i = \beta \rho_i (U_n - U_T) \quad (4)$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_n + a (t_T - t_n) = \beta_r \rho_i \varepsilon (U_n - U_T) \quad (5)$$

де  $\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_n$  - потік теплоти за рахунок теплопровідності;

$a (t_T - t_n)$  - потік теплоти за рахунок теплообміну;

$\beta_r \rho_i \varepsilon (U_n - U_T)$  - потік теплоти за рахунок випаровування;

$\beta \rho_i (U_n - U_T)$  - потік маси випаровуваної вологи;

$\lambda_m \cdot \delta_T \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_i$  - потік маси, що випаровується за рахунок термовологопровідності;

$\lambda_m \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)_i$  - потік маси, що випаровується за рахунок вологопровідності (дифузії);

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/м К;

$a$  - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup> К;

$\rho_o$  - щільність вологи, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta$  - коефіцієнт масовіддачі, м/с;

$\lambda_m$  - коефіцієнт масопровідності,

Початкові умови записуються в наступному вигляді:

$t(R, 0) = t_n = \text{const}; U(R, 0) = U_T,$

тут:  $\pm R$  - координати Z для верхньої і нижньої поверхні виробу при товщині виробу 2R;

$p$  - індекс для поверхні виробу.

Слід зазначити, що граничні умови 3 роду для рівняння (3) при зазначеному способі сушіння виробу записуються в формі рівняння (5).

Початкові умови записуються в наступному вигляді:

$$t(R, 0) = t_n = \text{const}; U(R, 0) = U_T, \quad (6)$$

де  $U_T$  - гігроскопічний вологовміст матеріалу виробу.

Необхідність розгляду періоду спадної швидкості фази сушіння розглядуваного процесу обумовлена, як зазначалось раніше, наявністю об'єктів, які знаходяться в стадії не тільки першого, але й другого періоду - спадної швидкості сушіння, коли фронт випаровування проник всередину матеріалу по координаті z.

У другому періоді сушіння видалається гігроскопічна (зв'язана) волога, з огляду на те, що вся вільна волога з поверхні матеріалу видалена. Таким чином, в умовах нехтування бародифузії, рушійною силою процесу масопереносу є градієнт вмісту вологи і температури.

В цьому випадку спільну систему рівнянь тепло- і масопереносу можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + a_m \delta_i \left( \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right), \quad (7)$$

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) + \varepsilon \tau \rho \frac{\partial U}{\partial \tau} + q \quad (8)$$

де:  $\rho$  - щільність матеріалу виробу, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta_i$  - термоградієнтний коефіцієнт для виробу, 1/К.

У початковий момент часу температуру  $t_n$  і вологовміст  $U_0(t)$  виробу приймаємо постійними:

$$t(z, 0) = t_n = \text{const}, \quad (9)$$

$$U(z, 0) = U_0(t) = \text{const}, \quad (10)$$

При цьому слід мати на увазі, що  $U_0(t)$  - гігроскопічний вологовміст виробу, який установився до моменту закінчення сушіння вільної вологи з поверхні виробу.

Граничні умови можуть бути записані у наступному вигляді:

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial U(0, \tau)}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

$$t(\pm R, \tau) = t_o + a(v) e^{-\frac{b(v)}{\tau} + c(\varphi)} e^{-\frac{m(\varphi)}{\tau}} \quad (12)$$

$$a_m \rho_o \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right) z = \pm R + a_m \rho_o b \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right) z = \pm R + \beta \rho_o \varepsilon (U_n - U_T) = 0 \quad (13)$$

де  $a_m \rho_o \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)_{z=\pm R}$  - дифузійний потік маси з поверхні виробу;

$|Z = \pm R$  - потік маси за рахунок термовологопровідності;

$\beta \rho_o \varepsilon (U_n - U_T)$  - потік маси за рахунок масообміну;

$\varphi$  - відносна вологість теплоносія;

$a(v)$ ,  $b(v)$ ,  $c(\varphi)$ ,  $m(\varphi)$  - емпіричні коефіцієнти.

Поставлена задача (1) - (13) не може бути вирішена аналітично без істотного спрощення в зв'язку з математичними труднощами, обумовленими як не лінійністю, так і змінністю коефіцієнтів переносу. Тому для наступного етапу реалізації шуканого рішення доцільно вибрати перехід до критеріальних рівнянь [6]. У даному випадку при переході до рівнянь подібності розглянутий період умовно постійної швидкості висушування.

Перетворюючи отримані диференціальні рівняння (1), (2) і крайові умови (4), (5) до безрозмірного вигляду і приймаючи в якості визначального критерію Нусельта, зв'язана система рівнянь подібності спільного тепломасопереносу для моменту часу, відповідного максимальній різниці рушійних потенціалів, перетворюється до наступного узагальненого вигляду:

$$\begin{cases} Nu_{\partial} = f_1(Pn Ko Po Gu D^* / H, D^* L) \\ Nu = f_2(Pn Ko Po Gu D^* / H, D^* L) \end{cases} \quad (14)$$

де  $Re$  - критерій Рейнольдса,

$Pr$  - критерій Прандтля.

$Pn$  - критерій Поснова,

$Ko$  - критерій Коссовіча,

$Po$  - критерій Померанцева,

$Nu_{\partial}$  - критерій Нусельта дифузійний,

$Gu$  - критерій Гухмана,

$D^* / H$ ,  $D^* / L$  - геометричні симплекси,

$D^*$  - еквівалентний діаметр насадки,

$L$  - довжина обтікання виробу,

$H$  - товщина шару виробу в насадці.

Визначення конкретних значень параметрів функцій  $f_1$  і  $f_2$  вимагає здійснення серії експериментів. Такі експериментальні дослідження були проведені і їх обробка дозволила отримати наступні критеріальні рівняння.

Середнє значення безрозмірного коефіцієнта масообміну для одиничного виробу в безмежному середовищі визначається співвідношенням:

$$Nu = 340 Po^{0,709} Re^{0,512} Gu^{0,531}. \quad (15)$$

Для невпорядкованої насадки:

$$Nu = 590 Po^{0,716} Re^{0,519} Gu^{0,539} (D^* / H)^{0,53} (D^* / L)^{0,361}. \quad (16)$$

Відсутність в отриманих рівняннях критеріїв  $Ko$ ,  $Pn$  і  $Pr$  обумовлено їх виродженням у зв'язку з фізичною та формальною автотемпературністю процесу сушіння щодо зазначених чисел подібності.

**Висновок.** Наведені рівняння описують експериментальні дані з похибкою менше 22% в діапазоні температур теплоносія (293-373) К, швидкостей потоку (1,0-3,9) м/с, потужності ІЧ-випромінювання (10-720) Вт/м<sup>2</sup>.

При подальших дослідженнях процесів сушіння м'ясних виробів слід уточнити параметри моделі для вибраних сушильних апаратів і описати конкретні геометричні виміри висушуваних виробів особливо слід звертати увагу на сировину з якої виготовляється продукт: яловичина, свинини, птиця.

### Список литературы

1. Бурдо О. Г. Энергетика пищевых технологий. Научные работы Одесской национальной академии харчових технологій. 2007. Vol. 1. № 30. P. 4–11.
2. Бурдо О. Г. Повышение энергетической эффективности процессов обезвоживания пищевого сырья. Интегрированные технологии та енергозбереження. 2008. № 2. С. 23–28.
3. Гинзбург А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. Издание второе, дополненное и переработанное. Пищевая промышленность. Москва. 1980. 288 с.
4. Пахомов П.Л., Шишко Л.С. Решение двумерных дифференциальных уравнений тепломассопереноса при кондуктивной сушке пищевых продуктов // Актуальные научно-методические проблемы в подготовке специалистов высшей квалификации для торговли та харчування: Зб. наук. праць. Частина 1. – Харків: ХДАТОХ, 1997. – С. 365-368.
5. Пахомов П.Л., Шишко Л.С. Решение краевых задач тепломассопереноса при сушке пищевых продуктов с использованием системы "Поле" // Придніпровський науковий вісник. Сер. "Машинобудування": – Дніпропетровськ: 1997. № 53 (64). – С. 12-13.
6. Пахомов П.Л., Синекон Н.С., Шишко Л.С. Об одной расчетной модели начально-краевой задачи тепломассопереноса // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. праць. Частина 2. – Харків: ХДАТОХ, 1998. – С. 46-48.

### References

1. Burdo O. G. Energetika pishchevykh tekhnologiy. Naukovі pratsі Odes'koї natsional'noї akademії kharchovikh tekhnologiy. 2007. Vol. 1. № 30. P. 4–11.
2. Burdo O. G. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti protsessov obezvozhvaniya pishchevogo syr'ya. Íntegrovanі tekhnologії ta yenergozberzhennya. 2008. № 2. S. 23–28.
3. Ginzburg A. S. Teplofizicheskiye kharakteristiki pishchevykh produktov. Spravochnik. Izdaniye vtoroye, dopolnennoye i pererabotannoye. Pishchevaya promyshlennost'. Moskva. 1980. 288 s.
4. Pakhomov P.L., Shishko L.S. Resheniye dvumernykh differentsial'nykh uravneniy teplomasso-perenosa pri konduktivnoy sushke pishchevykh produktov // Aktual'ni naukovо-metodichni problemi v pidgotovtsi spetsialistiv vishchoї kvalifikatsії dlya torģivli i kharchuvannya: Zb. nauk. prats'. Chastina 1. – Kharkiv: KHDA-TOKH, 1997. –S. 365-368.
5. Pakhomov P.L., Shishko L.S. Resheniye krayevykh zadach teplomassoperenosa pri sushke pishchevykh produktov s ispol'zovaniyem sistemy "Pole" // Pridni-prov'skiy naukoviy visnik. Ser. "Mashinobuduvannya": – Dnipropetrovsk: 1997. № 53 (64). – S. 12-13.
6. Pakhomov P.L., Sinekon N.S., Shishko L.S. Ob odnoy raschetnoy modeli nachal'no-krayevoy zadachi teplomassoperenosa // Progresivni resursozberigayuchi tekhnologii ta ikh yekonomichna obgruntovanist' u pidpriemstvakh kharchuvannya. Yekonomichni problemi torģivli: Zb. nauk. prats'. Chastina 2. – Kharkiv: KHDA-TOKH, 1998. – S. 46-48.

УДК 621.333.41

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШВИДКІСНОГО ТРАМВАЮ М. КРИВИЙ РІГ

Кухта О.О., студент, Криворізький національний університет

## INVESTIGATING EFFICIENCY OF RECUPERATION ENERGY USAGE FOR EXPRESS TRAM PULL-DRIVEN POWER SUPPLY IN KRYVYI RIH CITY

Kukhta O.O., Kryvyi Rih National University

**Анотація.** У статті здійснено аналіз ефективності використання рекуперативного гальмування на електроприводах трамваїв міського громадського транспорту та його вплив на тягову електричну мережу КП «Швидкісний трамвай». Для цього у роботі, наведено дані про парк підприємства, було досліджено швидкісний діапазон гальмування, визначено моду швидкісного діапазону, розраховано кількість рекуперативної енергії від одного гальмування і протягом робочої зміни. Проведено порівняння генерування енергії рекуперації трамваїв у складні одного і двох вагонів, з урахуванням пасажирів. Описано, як покращити якість згенерованої електроенергії. У результаті проведеного дослідження встановлено, що за допомогою рекуперативного гальмування можна повернути 19 % спожитої електроенергії у енергосистему.

## ЗМІСТ

## ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

ВИРІШЕННЯ ЕНЕРГО-ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ КРУП'ЯНОГО ВИРОБНИЦТВА	
<b>Хоренжий Н.В., Лапінська А.П.</b> .....	5
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГАЗАЦИИ ЖИДКОСТИ В КАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЯХ. ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ	
<b>Иваницкий Г.К., Целень Б.Я., Недбайло А.Е., Коник А.В.</b> .....	11
ІННОВАЦІЙНІ СПОСОБИ ЕНЕРГОПІДВОДУ У ПРОЦЕСАХ СУШІННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНОЇ СИРОВИНИ	
<b>Яровий І.І., Кашкано М.А., Маренченко О. І., Пилипенко Є.О.</b> .....	17
МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ШВИДКОСТЕЙ ТЕПЛОНОСІВ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ КАНАЛІ КОНТАКТНОГО АПАРАТУ	
<b>Кузьменко І.М.</b> .....	24
МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ ПРИ КОНВЕКТИВНОМУ СУШІННІ М'ЯСНИХ ВИРОБІВ	
<b>Ощипок І. М.</b> .....	29
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШВИДКІСНОГО ТРАМВАЮ М. КРИВИЙ РІГ	
<b>Кухта О.О.</b> .....	33
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В ПРОЦЕСІ ЖАРІННЯ ОЛІЙНОЇ СИРОВИНИ	
<b>Сорокова Н.М., Дідур В.В.</b> .....	37
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕД	
<b>Холявченко Л.Т., Опарин С.А., Давыдов С.Л.</b> .....	42
ПРОБЛЕМИ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ УКРАЇНИ	
<b>Бундюк А.М., Подпалова Ю.В., Коваленко А.К.</b> .....	46
ENERGY POLICY OPPORTUNITIES. HOW TO FACE CHALLENGES	
<b>Bezhan V., Zhytarenko V., Ostapenko O., Yakovleva O.</b> .....	48

ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНИХ І  
ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СУППОЗИТОРИЕВ	
<b>Шмагток А.И., Степанова О.Е., Сильнягина Н.Б.</b> .....	54
ТЕРМІЧНЕ РОЗКЛАДАННЯ ГРАНУЛЬОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ В УМОВАХ ЗМІННОЇ ГАЗОВОЇ АТМОСФЕРИ	
<b>Корінчевська Т.В., Михайлик В.А., Корінчук Д.М.</b> .....	59
АКТИВАТОРИ ПРОЦЕСУ ПОГЛИНАННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИМИ МІКРОВОДОРОСТЯМИ	
<b>Дячок В.В., Мандрик С.Т., Гуглич С.І.</b> .....	64
РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОГО ТЕПЛОМАСООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	
<b>Грабова Т. Л., Шмагток О.І., Сильнягіна Н.Б.</b> .....	70
ДОСЛІДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ В НАСОСАХ РІЗНИХ ТИПІВ	
<b>Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Жукотський Е.К.</b> .....	77
ВИНИКНЕННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ ПІД ЧАС РОБОТИ НАСОСІВ РІЗНОГО ТИПУ	
<b>Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Жукотський Е.К.</b> .....	80
ГІДРОДИНАМІКА ГАЗОРІДНИХ ПОТОКІВ НА КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ СТРУКТУРАХ	
<b>Туз В.О., Лебедь Н.Л., Трокоз Я.Є.</b> .....	85
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСТРАКЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРОДУКТОВ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИМЕТИЛСУЛЬФОКСИДА	
<b>Челтонов М.М., Опарин С.А., Матросов А.С., Кириченко А.Л.</b> .....	91
МОДУЛЬНИЙ ПРИНЦИП ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЛЛЕТ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ	
<b>Бунецкий В.А., Бурдо О.Г., Зыков А.В., Войтенко А.К., Безбах И.В., Кашкарев А.А.</b> .....	94
ARTIFICIAL MICRO RNA (AMIRNA): A POTENT TOOL FOR GENE SILENCING IN PLANT	