

7. Остапенко О.П., Портнов В.М., Волошин А.Д. Показники енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення на основі когенераційно-теплонасосних установок та пікових джерел теплоти // Електронне наукове видання матеріалів XLVI науково-технічної конференції Вінницького національного технічного університету (22 – 24 березня 2017 р., Вінниця). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2017/paper/view/2875/2248>.
8. Остапенко О.П., Лещенко В.В., Тихоненко Р.О. Енергетична ефективність парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами // Наукові праці ВНТУ. – 2014. – № 4. URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/421/419>.

#### References

1. Tkachenko, S. Y., Ostapenko, O. P. (2009). Parokompresiyini teplonasosni ustanovky v systemakh teplopостачання, monographiya, Vinnytsia, UNIVERSUM-Vinnytsia, 176 p.
2. Leeuwen, Richard P., Fink, J., Wit, Jan B., Smit, Gerard J.M. (2015). Upscaling a district heating system based on biogas cogeneration and heat pumps, Energy, Sustainability and Society, 5 (16). Available at: <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0044-x>.
3. Mueller, S.; Tuth, R.; Fischer, D.; Wille-Hausmann, B.; Wittwer, C. (2014). Balancing fluctuating renewable energy generation using cogeneration and heat pump systems, Energy technology, 2 (1), 83 – 89.
4. Bileka, B. D., Garkusha, L. K. (2012). Kogeneratsyonno-teplonasosnye tehnologii v sistemakh goryachego vodonabzheniya bol'shoi moshchnosti, Promyshlennaya teplotekhnika, 34 (4), 52 – 57.
5. Saf'yants, S. M., Kolesnichenko, N. V., Veretennikova, T. YE. (2011) Issledovaniye skhemy istochnika teloelektrosnabzheniya s regulirovaniem nagruzok na baze ispol'zovaniya teplovykh nasosov, Promyshlennaya teplotekhnika, 33 (3), 79 – 85.
6. Ostapenko, O. P. (2016). Energy efficiency of energy supply systems, based on combined cogeneration heat pump installations and peak sources of heat, Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, 1. Available at: <http://works.vntu.edu.ua/index.php/works/article/view/462/464>.
7. Ostapenko, O. P., Portnov, V. M., Voloshyn, A. D. (2017). Pokaznyky energoekonomichnoyi efektyvnosti system energozabezpechennya na osnovi kogeneratsiyno-teplonasosnykh ustanovok ta pikovykh dzherel teploty, Elektronne naukove vydannya materialiv XLVI naukovo-tekhnichnoyi konferentsii Vinnyts'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universytetu (22 – 24 bereznya 2017, Vinnytsia). Available at: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2017/paper/view/2875/2248>.
8. Ostapenko, O. P., Leshchenko, V. V., Tikhonenko, R. O. (2014). Energy efficiency of steam compressor heat pumps with electric and cogeneration drive, Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, 4. Available at: <http://works.vntu.edu.ua/index.php/works/article/view/25/25>.

УДК 664.854

## ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ В МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСУ КОНВЕКТИВНО-ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО СУШІННЯ КУЛЬТИВОВАНИХ ГРИБІВ

Малежик І. Ф., д. т. н., Бурлака Т. В. аспірант, Дубковецький І. В. к. т. н., доцент,  
Деканський В. С. асистент  
Національний університет харчових технологій

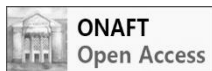
## APPLICATION OF THE APPROXIMATION THEORY IN MODELING OF THE PROCESS OF CONVECTIVE - THERMORADIATIVE DRYING OF CULTIVATED MUSHROOMS

Malezhik I. F. D., Ph.D., Burlaka T. V. Postgraduate Student,  
Dubkovetsky I.V., candidate of technical sciences, associate professor, Dekansky V.Y. assistant  
National University of Food Technology

Copyright © 2017 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**Анотація.** Дослідження процесів, що протікають в технологічних установках, встановлення закономірностей їх протікання, знаходження залежностей, необхідних для їх аналізу і розрахунку, можна проводити різними методами: теоретичним, експериментальним, подоби. Теоретичний метод заснований на складанні та вирішенні системи диференціальних рівнянь, що описують процес. Однак багато процесів технології такі

складні, що вдається лише скласти систему диференціальних рівнянь і встановити умови однозначності. Вирішити ці рівняння відомими в математиці методами не представляється можливим.

Експериментальний метод дозволяє на основі досвідчених даних отримати емпіричні рівняння, що описують даний процес. Складнощі експериментального методу полягають у необхідності проведення великої кількості дослідів на реальних технологічних установках.

Складність деяких процесів іноді не дає змоги або розв'язати складену систему диференціальних рівнянь з використанням найкращих ЕОМ, або навіть поставити математичну задачу. У таких випадках змінні величини спочатку групують у безрозмірні комплекси або на основі диференціальних рівнянь, або шляхом використання методу аналізу розмірностей, а відтак одержують загальну функціональну залежність між цими комплексами. В основі даного методу лежить друга теорема Федермана - Бекінгема, що дає можливість обробки експериментальних даних у формі загального критеріального рівняння.

Інтенсивність досліджуваного процесу сушіння визначають коефіцієнтом масовіддачі  $\beta$  і коефіцієнтом тепловіддачі  $\alpha$ . У зв'язку з труднощами, що виникають в результаті аналітичного моделювання, слід застосувати експериментальне моделювання, основною науковою базою якого є теорія подібності і метод «аналізу розмірностей». На основі його загальних принципів встановлюємо вид критеріального рівняння для розрахунку коефіцієнта масовіддачі  $\beta$  і коефіцієнтом тепловіддачі  $\alpha$ .

**Abstract.** The study of processes occurring in technological installations, the establishment of the laws of their flow, finding dependencies necessary for their analysis and calculation, can be carried out by various methods: theoretical, experimental, similarities.

The theoretical method is based on the compilation and solving a system of differential equations describing the process. However, many processes of technology are so complex that we can only complete the system of differential equations and establish the conditions of uniqueness. It is not possible to solve these equations in methods known in mathematics.

The experimental method allows us to obtain empirical equations describing this process on the basis of experimental data. The complexity of the experimental method consists of the necessity of conducting a large number of experiments on real technological installations.

The complexity of some processes sometimes does not make it possible either to solve a complex system of differential equations using the best computers, or even to put a mathematical problem. In such cases, variables are initially grouped into dimensionless complexes either on the basis of differential equations, or by using the dimensional analysis method, and thus obtain a general functional relationship between these complexes. The basis of this method lies in the second theorem of Federmann-Buckingham, which enables the processing of experimental data in the form of a general criterion equation.

The intensity of the investigated drying process is determined by the coefficient of mass-transfer  $\beta$  and the coefficient of heat transfer  $\alpha$ . In connection with the difficulties arising from the analytical modeling, experimental simulation should be applied, the basic scientific base of which is the theory of similarity and the method of "dimensional analysis". On the basis of its general principles, we establish the kind of a criterion equation for calculating of mass-transfer coefficient  $\beta$  and the coefficient of heat transfer  $\alpha$ .

**Ключові слова:** коефіцієнт масовіддачі, тепловіддача, аналіз розмірностей, сушіння, культивовані гриби.

**Keywords:** mass-transfer coefficient, heat transfer, dimensional analysis, drying, cultivated mushrooms.

**Вступ.** Раціональні параметри сушіння та інтенсифікація процесу досягається комбінацією таких параметрів сушіння, як форма та розміри матеріалу, його питоме навантаження, швидкість руху і температура теплоносія. Істотний вплив на тривалість процесу має температура сушильного агента. Підвищенням температури досягається інтенсифікація зневоднення, час теплового впливу зводиться до мінімуму, що забезпечує економічність процесу. Однак при виборі теплового режиму необхідно враховувати гранично-допустиму температуру конкретного матеріалу, що визначається його термостійкістю. Аналіз хімічного складу культивованих грибів глива звичайна показує, що вони складаються з таких важливих для організму людини термолабільних речовин як білки, вуглеводи, органічні кислоти, ферменти, в яких відбуваються зміни при температурах 65–70°C. Тому одержати продукт високої якості можливо за умови, що температура матеріалу в процесі сушіння не перевищує свого критичного значення. Звідси витікає, що температуру теплоносія протягом усього процесу сушіння необхідно змінювати відповідно до закономірностей переносу теплоти і вологи у конкретному матеріалі.

Комбінація конвективного і терморадіаційного сушіння при імпульсному донесенні теплоти до поверхні культивованих грибів дозволяє досягнути бажаних якісних технологічних характеристик і зменшити витрати енергії в порівнянні з конвективним чи терморадіаційним сушінням. Це було доведено серією досліджень відображених в статтях [2,3,4]. Але система процесу описується великою кількістю факторів, які характеризують кінетику конвективно-терморадіаційного сушіння. Тому доцільно використовувати методи математичного моделювання для прогнозування оптимальних умов проведення процесу. Аналітичне моделювання, що

використовувалось для опису процесу конвективно-терморадіаційного сушіння, є дещо спрощеним та не враховує факторів визначення імпульсного введення променевої енергії на поверхні продукту та в прилежовому паро-повітряному шарі. У зв'язку з труднощами, що виникають в результаті аналітичного моделювання, слід застосувати експериментальне моделювання, основною науковою базою якого є теорія подібності і метод «аналізу розмірностей».

**Результати.** Математичний опис процесу конвективно-терморадіаційного сушіння було одержано емпіричним методом. Інтенсивність процесу видалення вологи при конвективно-терморадіаційному сушінні визначають коефіцієнтом масовіддачі від прилежового шару до паро-повітряного середовища, що оточує продукт. Інтенсивність процесу видалення вологи також залежить від теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем, що характеризується коефіцієнтом тепловіддачі.

**Складання критеріального рівняння в залежності від коефіцієнта масовіддачі.** Коефіцієнт масовіддачі залежить від наступних параметрів: швидкість теплоносія ( $w$ ), розміри частинок сировини ( $d$ ), коефіцієнт дифузії ( $D$ ), питома маса продукції ( $P_s$ ), густина вологи ( $\rho_B$ ), в'язкість ( $\mu$ ). В досліджуваних умовах бародифузія пов'язана з впливом інфрачервоного випромінювання визначається різницею тисків, величина яких прямо пропорційна енергії випромінювання і тієї енергії, яка необхідна для пароутворення ( $r$ ) і потужності опромінення ( $N_{оп}$ ).

$$\beta = f(d, D, \mu, r, N_{оп}, \rho_B, w, P_s)$$

Припустимо, що  $w, d, D, P_s, \rho_B, \mu, r, N_{оп}$  мають невідомі показники ступеня  $k, l, m, n, o, p, s, t$ . Таким чином, шукану функціональну залежність можна представити у наступному вигляді

$$\beta = d^k \cdot D^l \cdot \mu^m \cdot r^n \cdot N_{оп}^o \cdot \rho_B^p \cdot w^r \cdot P_s^s$$

Основні складові формули занесено в табл.1.

Очевидно, що для даного факторного простору число змінних 9 за кількості розмірностей 3. Тому за  $\pi$ -теоремою кількості безрозмірних комплексів  $9 - 3 = 6$ .

**Таблиця 1 – Основні параметри досліджуваного процесу**

Найменування параметра	Символ	Степінь	Розмірність
Середній коефіцієнт масовіддачі	$\beta$		$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Розміри частинок	$d$	$k$	$\text{м}$
Коефіцієнт дифузії	$D$	$l$	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
В'язкість	$\mu$	$m$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
Питома теплота пароутворення	$r$	$n$	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
Потужність ІЧ – генераторів	$N_{оп}$	$o$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$
Густина вологи	$\rho_B$	$p$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Швидкість теплоносія	$w$	$r$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Питома маса продукції	$P_s$	$s$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$

Для здійснення математичного аналізу рівняння складаємо матрицю в табл.2.

**Таблиця 2 – Матриця розмірностей досліджуваного степеневого ряду**

	$k$	$l$	$m$	$n$	$o$	$p$	$r$	$s$	$\beta$
$M$			1		1	1		1	0
$L$	1	2	-1	2	2	-3	1	-2	1
$\tau$		-1	-1	-2	-3		-1		-1

Всі ці параметри складаються з трьох основних розмірностей: маси ( $M$ ), довжини ( $L$ ), часу ( $\tau$ ), (табл. 2). Розмірності параметрів, що входять в рівняння, відомі, його можна записати:

$$[L\tau^{-1}] = [L]^k [L^2\tau^{-1}]^l [ML^{-1}\tau^{-1}]^m [M^2L^{-2}]^n [ML^2\tau^{-3}]^o \cdot [ML^{-3}]^p [L\tau^{-1}]^r [ML^{-2}]^s$$

або, розкривши дужки, одержимо

$$[L\tau^{-1}] = L^{k+2l-m+2n+2o-3p+r-2s} \cdot M^{m+o+p+s} \cdot \tau^{-l-m-2n-3o-r}$$

Зрівняємо показники ступенів при однакових символах розмірностей і одержимо три рівняння:

$$\begin{cases} k + 2l - m + 2n + 2o - 3p + r - 2s = 1 \\ m + o + p + s = 0 \\ -l - m - 2n - 3o - r = -1 \\ m = 1 - l - 2n - 3o - r \\ p = -1 + l + 2n + 2o + r - s \\ k = 1 - 2l + 1 - l - 2n - 3o - r - 2n - 2o - 3 - 3l + 6n + 6o + 3r - 3s - r + 2s \\ k = -1 + 2n + o + r - s \end{cases}$$

Одержані значення підставимо в рівняння.

$$\beta = d^{-1+2n+o+r-s} \cdot D^l \cdot \mu^{1-l-2n-3o-r} \cdot r^n \cdot N_{\text{он}}^o \cdot \rho_B^{-1+l+2n+2o+r-s} \cdot w^r \cdot P_s^s$$

Згрупуємо величини за показниками степенів і одержимо критеріальне рівняння у вигляді

$$\frac{\beta d \rho}{\mu} = \left( \frac{\mu^2}{d^2 r \rho^2} \right)^{-n} \cdot \left( \frac{d N_{\text{он}} \rho^2}{\mu^3} \right)^o \cdot \left( \frac{d^2 \rho w}{\mu} \right)^r \left( \frac{\mu}{D \rho} \right)^{-l} \left( \frac{P_s}{d \rho} \right)^s$$

Групи  $\frac{\beta d \rho}{\mu}$  і  $\frac{\mu}{D \rho}$  дають відношення коефіцієнта конвективного масообміну до коефіцієнта дифузії – число Шервуда

$$\frac{\beta d \rho}{\mu} \cdot \frac{\mu}{D \rho} = \frac{\beta d}{D} = Sh$$

Відношення кількості руху потоку вологи до дифузійного потоку – число Шмідта

$$\frac{\mu}{D \rho} = \frac{v}{D} = Sc$$

Комбінація

$$\left( \frac{\mu^2}{d^2 r \rho^2} \right)^{-n} \cdot \left( \frac{d N_{\text{он}} \rho^2}{\mu^3} \right)^o = \frac{N_{\text{он}}}{\mu d r} = Bu$$

число Бурдо, число енергетичної дії, що встановлює співвідношення між енергією випромінювання і енергією, яка необхідна для перетворення в пару вологи.

Відношення  $\frac{d \rho w}{\mu}$  - число Рейнольдса

$$\frac{d \rho w}{\mu} = Re$$

Комплекс  $\left( \frac{P_s}{d \rho} \right)^s = A$  є безрозмірним і враховує продуктивність досліджуваного процесу.

Отже структура критеріального рівняння через числа подібності буде наступною:

$$Sh = A \cdot Sc^o \cdot Re^\pi \cdot Bu^\varepsilon$$

Константи  $A, o, \pi, \sigma, \varepsilon$  визначаються експериментально і наведені в дод.

**Таблиця 3 – Параметри числами подібності і досліджуваного процесу**

Sc	Sc <sup>o</sup>	Re	Re <sup>π</sup>	Bu	Bu <sup>ε</sup>	A	Sc <sup>o</sup> · Re <sup>π</sup>	Sc <sup>o</sup> · Re <sup>π</sup> · Bu <sup>ε</sup>
0,214	2,434	2549,751	358,82	6,076 · 10 <sup>-10</sup>	9,787 · 10 <sup>5</sup>	0,04	-2,281	21,022
0,218	2,408	3569,652	461,82	9,015 · 10 <sup>-10</sup>	7,573 · 10 <sup>5</sup>	0,083	-2,351	21,258
0,223	2,377	4589,552	557,60	1,196 · 10 <sup>-9</sup>	6,302 · 10 <sup>5</sup>	0,129	-2,386	21,292
0,227	2,353	5609,453	648,17	1,365 · 10 <sup>-9</sup>	5,783 · 10 <sup>5</sup>	1,833	-2,414	21,402

В результаті визначених констант із графічних залежностей та на основі розрахункових і експериментальних даних отримані критеріальні рівняння можна представити у вигляді:

$$Sh = A \cdot Sc^{-0,58} \cdot Re^{0,75} \cdot Bu^{-0,65}$$

**Складання критеріального рівняння в залежності від коефіцієнта тепловіддачі.** Коефіцієнт тепловіддачі характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем. Він чисельно дорівнює кількості теплоти, що віддається (або приймається) одиницею поверхні в одиницю часу при різниці температур між поверхнею тіла і навколишнім середовищем в 1°.

Особливий вплив на теплообмін чинять наступні фізичні параметри: теплопровідність  $\lambda$ , питома теплоємність  $c$ , густина  $\rho$ , коефіцієнт температуропровідності  $a$  і коефіцієнт в'язкості  $\mu$ .

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від наступних параметрів: швидкість теплоносія ( $w$ ), розміри частинок сировини ( $d$ ), коефіцієнт дифузії ( $D$ ), питома маса продукції ( $P_S$ ), густина вологи ( $\rho_B$ ), в'язкість ( $\mu$ ). В досліджуваних умовах бародифузія пов'язана з впливом інфрачервоного випромінювання визначається різницею тисків, величина яких прямо пропорційна енергії випромінювання і тієї енергії, яка необхідна для пароутворення ( $r$ ) і потужності опромінення ( $N_{оп}$ ).

$$\alpha = f(w, d, \rho, \lambda, c, \mu, r, N_{оп}, P_S, a)$$

Припустимо, що  $w, d, \rho, \lambda, c, \mu, r, N_{оп}, P_S, a$  мають невідомі показники ступеня  $a, b, c, d, e, k, l, m, n, o$ . Таким чином, шукану функціональну залежність можна представити у наступному вигляді

$$\alpha = w^a \cdot d^b \cdot \rho^c \cdot \lambda^d \cdot c^e \cdot \mu^k \cdot r^l \cdot N_{оп}^m \cdot P_S^n \cdot a^o$$

Основні складові формули заносимо в табл.4.

**Таблиця 4 – Основні параметри досліджуваного процесу**

Найменування параметра	Символ	Степінь	Розмірність
Коефіцієнт тепловіддачі			кг/(с <sup>3</sup> ·К)
Швидкість теплоносія	$w$	$a$	м·с <sup>-1</sup>
Розміри частинок	$d$	$b$	м
Густина вологи	$\rho_B$	$c$	кг·м <sup>-3</sup>
Коефіцієнт теплопровідності	$\lambda$	$d$	м·кг/(с <sup>3</sup> ·К)
Питома (масова) теплоємність	$c$	$e$	м <sup>2</sup> /(с <sup>2</sup> ·К)
В'язкість	$\mu$	$k$	кг·м <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>
Питома теплота пароутворення	$r$	$l$	м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup>
Потужність ІЧ – генераторів	$N_{оп}$	$m$	кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-3</sup>
Питома маса продукції	$P_S$	$n$	кг·м <sup>-2</sup>
Коефіцієнт температуропровідності	$a$	$o$	м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>

Для здійснення математичного аналізу рівняння складаємо матрицю в табл.5.

**Таблиця 5 – Матриця розмірностей досліджуваного степеневого ряду**

	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$k$	$l$	$m$	$n$	$o$	$\alpha$
$M$			+1	+1		+1		+1	+1		+1
$L$	+1	+1	-3	+1	+2	-1	+2	+2	-2	+2	0
$\tau$	-1			-3	-2	-1	-2	-3		-1	-3
$K$				-1	-1						-1

Всі ці параметри складаються з чотирьох основних розмірностей: маси ( $M$ ), довжини ( $L$ ), часу ( $\tau$ ), температури ( $K$ ) (табл. 5). Розмірності параметрів, що входять в рівняння, відомі, його можна записати:

$$[M \tau^{-3} K^{-1}] = [L \tau^{-1}]^a \cdot [L]^b \cdot [ML^{-3}]^c \cdot [ML \tau^{-3} K^{-1}]^d \cdot [L^2 \tau^{-2} K^{-1}]^e \cdot [ML^{-1} \tau^{-1}]^k \cdot [L^2 \tau^{-2}]^l \cdot [ML^2 \tau^{-3}]^m \cdot [ML^{-2}]^n \cdot [L^2 \tau^{-1}]^o$$

або, розкривши дужки, одержимо:

$$[M \tau^{-3} K^{-1}] = M^{c+d+k+m+n} \cdot L^{a+b-3c+d+2e-k+2l+2m-2n+2o} \cdot \tau^{-a-3d-2e-k-2l-3m-o} \cdot K^{-d-e}$$

Зрівняємо показники ступенів при однакових символах розмірностей і одержимо три рівняння:

$$\begin{cases} c + d + k + m + n = 1 \\ a + b - 3c + d + 2e - k + 2l + 2m - 2n + 2o = 0 \\ -a - 3d - 2e - k - 2l - 3m - o = -3 \\ -d - e = -1 \end{cases}$$

$$d = 1 - e$$

$$c = e - k - m - n$$

$$a = 3 - 3d - 2e - k - 2l - 3m - o$$

$$a = e - k - 2l - 3m - o$$

$$b = -a + 3c - d - 2e + k - 2l - 2m + 2n - 2o$$

$$b = -1 - k - 2m + e - n - o$$

Одержані значення підставимо в рівняння 4.37.

$$\alpha = w^{e-k-2l-3m-o} \cdot d^{-1-k-2m+e-n-o} \cdot \rho^{e-k-m-n} \cdot \lambda^{1-e} \cdot c^e \cdot \mu^k \cdot r^l \cdot N_{\text{он}}^m \cdot P_s^n \cdot a^o$$

Згрупуємо величини за показниками степенів і одержимо критеріальне рівняння у вигляді:

$$\frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = \left( \frac{wd\rho c}{\lambda} \right)^e \cdot \left( \frac{wd\rho}{\mu} \right)^{-k} \cdot \left( \frac{r}{w^2} \right)^l \cdot \left( \frac{wd}{a} \right)^{-o} \cdot \left( \frac{N_{\text{он}}}{w^3 d^2 \rho} \right)^m \cdot \left( \frac{P_s}{d\rho} \right)^n$$

Число Нусельта – розглядають як співвідношення між інтенсивністю теплопередачі та напругою температурного поля в прикордонному шарі потоку теплоносія.

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$$

Число Пекле

$$\text{Pe} = \frac{wd\rho c}{\lambda}$$

Число Рейнольдса - міра відношення сил інерції та молекулярного тертя, визначає подібність режиму течії в системі.

$$\text{Re} = \frac{wd\rho}{\mu}$$

Число Прандтля є мірою відношення інтенсивності передачі кількості руху за рахунок молекулярного переносу та інтенсивності переносу кількості теплоти за рахунок вільної конвекції, визначає подібність температурних та швидкісних полів.

$$\text{Pr} = \frac{wd}{a}$$

Фізичний сенс числа Bu полягає в тому, що встановлюється співвідношення між енергією випромінювання і тією енергією, яка необхідна для перетворення на пару всієї води, яка знаходиться в продукті.

$$\text{Bu} = \frac{N_{\text{он}}}{rwd^2 \rho}$$

Комплекс  $\left( \frac{P_s}{d\rho} \right)^n = A$  є безрозмірним і враховує продуктивність досліджуваного процесу.

Отже структура критеріального рівняння через числа подібності буде наступною:

$$\text{Nu} = A \cdot \text{Pe}^\sigma \cdot \text{Re}^\pi \cdot \text{Pr}^\varepsilon \cdot \text{Bu}^\zeta$$

Константи  $A, \sigma, \pi, \varepsilon, \zeta$  визначаються експериментально.

**Таблиця 6 – Параметри чисел подібності і досліджуваного процесу**

Pe	Pe <sup>σ</sup>	Re	Re <sup>π</sup>	Pr	Pr <sup>ε</sup>	Bu	Bu <sup>ζ</sup>	A
5681,286	29,12	6249,4	189,45	103,84	0,039	48,57·10 <sup>-7</sup>	408350,17	50,3663
7530,719	32,51	5917	183,34	136,84	0,032	71,82·10 <sup>-7</sup>	543299,62	104,2654
9179,104	35,11	5609,5	177,56	165,93	0,028	86,24·10 <sup>-7</sup>	620949,71	160,9756
10742,76	37,34	5371,4	173,00	193,07	0,025	96,82·10 <sup>-7</sup>	675680,19	220,8835

В результаті визначених констант із графічних залежностей та на основі розрахункових і експериментальних даних отримані критеріальні рівняння можна представити у вигляді:

$$\text{Nu} = A \cdot \text{Pe}^{0,39} \cdot \text{Re}^{0,6} \cdot \text{Pr}^{-0,7} \cdot \text{Bu}^{0,73}$$

**Висновок.** За даними експериментальних досліджень, при використанні методу аналізу розмірності та теореми Федермана-Бекінгема було побудовано критеріальні рівняння процесу масообміну та теплообміну при конвективно-терморадіаційному сушінні культивованих грибів, що визначаються числами Пекле, Рейнольдса, Прандтля, Бурдо, функцією, яка характеризує продуктивність досліджуваного процесу; та дозволяє сформулювати рекомендований ряд параметрів робочого режиму. Константи визначались дослідним шляхом, для чого бувався графік залежності у логарифмічній системі координат.

#### Література

1. Кафаров В.В. Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1982. 655 с.

2. Дубковецький І.В., Малезик І.Ф., Бурлака Т.В. Визначення основних тепломасообмінних параметрів сушіння культивованих грибів при різних способах енергопідведення // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. Т. 80, вип. 1. С. 53-58.
3. Дубковецький І.В., Малезик І.Ф., Бурлака Т.В. Вплив швидкості теплоносія на основні тепломасообмінні параметри конвективно-терморадіаційного сушіння культивованих грибів // Наукові праці НУХТ. 2016. Т. 22, №4. С.141-148.
4. Исследование биологически активных веществ при сушке культивированных грибов вешенки / Бурлака Т.В. и др. // Научни трудове Хранителни технологии. Пловдив. 2015. Т. LXII. С. 331-336

#### References

1. Kafarov V.V. (1982). Osnovy massoperedachy. M.: Vysshaya shkola., 655 s.
2. Dubkovets'kyu I.V., Malezhyk I.F., Burlaka T.V. (2016). Vyznachennya osnovnykh teplomasoobminnykh parametriv sushinnya kul'tyvovanykh hrybiv pry riznykh sposobakh enerhopidvedennya. Naukovi pratsi ONAKHT. – Odesa.: 80(1). 53-58.
3. Dubkovets'kyu I.V., Malezhyk I.F., Burlaka T.V. (2016). Vplyv shvydkosti teplonosiya na osnovni teplomasoobminni parametry konvektyvno-termoradiatsiyoho sushinnya kul'tyvovanykh hrybiv. Naukovi pratsi NUKHT. 22(4). 141-148.
4. Burlaka T. V., Dubkovetskyu Y.V., Malezhyk Y. F., Zhukova YA.F. (2015). Yssledovanye byolohychesky aktyvnykh veshchestv pry sushke kul'tyvyrovanykh hrybov veshenky. Nauchny trudove Khranytelny tekhnolohyy. Plovdyv. LXII. 331-336.

УДК 620.97+662.99+621.8.035

### ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОАДХОДЖЕННЯ ГЕЛІОПАНЕЛІ ДЛЯ ВИРОБЛЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Козін В. М., к. т. н., Винниченко Б. О., студент  
Сумський державний університет

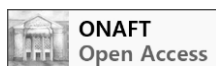
### IMPROVE OF HEAT SUPPLY OF HELIOPANEL FOR HEAT ENERGY GENERATION

Kozin V. M., PhD, Vynnychenko B. O., student  
Sumy State University

Copyright © 2017 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**Анотація.** Стаття присвячена проблемі підвищення теплонадходження геліопанелі, що працює для вироблення теплової енергії. Такі пристрої можуть використовуватися для отримання гарячої води та у системах опалення «тепла підлога». До переваг таких систем треба віднести їх повну автономність, надійність, простоту конструкції, тривалий термін служби та ін. Однак робота геліопанелі повністю залежить від кількості ефективно засвоєної нею теплової енергії сонця, яка, у свою чергу, залежить як від конструкції та властивостей матеріалів панелі, так і від кількості спрямованого сонячного випромінювання, що визначається географічним розташуванням панелі, періодом року, часом доби та геометрією взаємного розміщення площини панелі і напрямом падіння на неї сонячного променя.

Врахування динаміки кута падіння сонячного променя на геліопанель дозволяє суттєво підвищити її теплосвоєння та збільшити тривалість сонячного опромінення, а отже, – покращити енергетичну ефективність альтернативного джерела теплової енергії, що особливо актуально при розміщенні панелі у північній та центральній частинах країни, які відносять до четвертої зони з найменшим середньорічним сонячним випромінюванням до 1000 кВт·год/м<sup>2</sup>.

**Abstract.** Currently problem of energy due to the constant growth of tariffs for energy: water, electricity and heat is acute. The situation was reinforced by the lack of sufficient amount of domestic reserves of natural gas, coal and other minerals – energy sources which are used in traditional energetics. Therefore, the growing demand for energy in its various forms significantly accelerates the introduction of devices and systems that operate from alternative and renewable sources. This area is developed very actively, but as with all things new, these devices still have a relatively low efficiency.