

УДК 664.723.047

**Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В.***Одесская государственная академия холода*

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ДВИЖУЩЕМСЯ ПЛОТНОМ СЛОЕ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ МИКРОВОЛНОВО-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ

Розраховано розподіл температур у щільному рухомому шарі зерна при мікрохвильово-конвективному сушінні при різних значеннях продуктивності позитивного та негативного внутрішніх джерел теплоти, коефіцієнта ослаблення мікрохвильової енергії в шарі, швидкостей компонентів, розміру часток. Досліджено вплив цих факторів на поле температур.

Рассчитаны распределения температур в плотном движущемся слое зерна при микроволново-конвективной сушке при различных значениях производительностей положительного и отрицательного внутренних источников теплоты, коэффициента ослабления микроволновой энергии в слое, скоростей компонентов, размера частиц. Исследовано влияние этих факторов на поле температур.

The temperature distributions in packed moving bed of grain with microwave drying by different values of capacity for positive and negative internal heat sources, coefficient of microwave energy attenuation in bed, velocities of components and size of particles were calculated. The influence of these factors on the temperature field was investigated.

$a$  – удельная поверхность частиц в единице объема слоя,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  
 $c$  – теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $d$  – диаметр частиц,  $\text{м}$ ;  
 $q_{v1}$  – производительность положительного внутреннего источника теплоты,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  
 $q_{v2}$  – производительность отрицательного внутреннего источника теплоты,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  
 $m$  – коэффициент ослабления интенсивности микроволновой энергии в слое,  $\text{м}^{-1}$ ;  
 $r$  – удельная теплота парообразования,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  
 $t$  – текущая температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $u$  – влагосодержание,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;

$w$  – скорость,  $\text{м}/\text{с}$ ;  
 $x$  – расстояние от входного сечения,  $\text{м}$ ;  
 $\alpha_m$  – коэффициент межкомпонентного теплообмена,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  
 $\beta$  – плотность укладки слоя;  
 $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $v$  – избыточная температура.

**Индексы:**

$c$  – сухой материал;  
 $G$  – газовый компонент;  
 $m$  – твердый компонент;  
 $0$  – значение на входе в сушилку.

Одним из путей повышения эффективности процесса сушки является комбинированный подвод теплоты (кондуктивно-конвективный, конвективно-радиационный, микроволново-конвективный, микроволново-радиационный). Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов сушки разнообразных материалов при комбинированном (одновременном, последовательном, циклическом) подводе теплоты приведены в [1–7] и др. Весьма перспективен одновременный микроволново-конвективный теплоподвод, позволяющий обеспечить высокую скорость сушки и температурный режим, необходимый для получения

высококачественного продукта.

В настоящей статье рассматривается температурное поле в движущемся плотном слое дисперсного материала при микроволново-конвективной сушке. Выбор рациональных режимных параметров такого процесса для конкретного материала (мощности магнетронов, температуры и скорости сушильного агента, скорости слоя) может быть выполнен на основе анализа влияния указанных факторов на скорость сушки и поле температур. Ниже приведены результаты такого расчетного анализа, выполненного по зависимостям, полученным на основе двухкомпонентной го-

могенной модели теплопереноса в движущемся слое при микроволново-конвективной сушке [8,9]. Ограничимся рассмотрением периода постоянной скорости сушки, в котором из материала удаляется основное количество влаги. В

этом периоде изменение температур газового (сушильного агента) и твердого (частиц) компонентов по высоте сушилки описывается следующими зависимостями:

$$\vartheta_{\Gamma} = \frac{B_1 \vartheta_{m0}}{P_2} (e^{P_2 x} - 1) + H_1 \left[ \frac{1}{P_2(P_2 - m)} e^{P_2 x} + \frac{1}{m(m - P_2)} e^{mx} + \frac{1}{P_2 m} \right] + H_2 \left( \frac{1}{P_2^2} e^{P_2 x} - \frac{1}{P_2^2} - \frac{x}{P_2} \right), \quad (1)$$

$$\vartheta_m = \vartheta_{\Gamma} + \vartheta_{m0} e^{P_2 x} + \frac{H_1}{m - P_2} (e^{mx} - e^{P_2 x}) - \frac{H_1}{P_2} (1 - e^{P_2 x}), \quad (2)$$

$$\text{Здесь: } B_1 = \frac{\alpha_m a}{\rho_{\Gamma} c_{p\Gamma} (1 - \beta) w_{\Gamma}}, \text{ M}^{-1} \quad (3)$$

$$P_2 = - (B_1 + B_2), \quad (7)$$

$$B_2 = \frac{\alpha_m a}{\rho_m c_m \beta w_m}, \text{ M}^{-1} \quad (4)$$

$$a = \frac{6\beta}{d}, \quad (8)$$

$$H_1 = \frac{q_{v1}}{\rho_m c_m \beta w_m}, \text{ K/M} \quad (5)$$

$$q_{v2} = \rho_c r \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (9)$$

$$H_2 = \frac{q_{v2}}{\rho_m c_m \beta w_m}, \text{ K/M} \quad (6)$$

где  $\vartheta_{\Gamma} = t_{\Gamma} - t_{\Gamma 0}$ ;  $\vartheta_m = t_m - t_{\Gamma 0}$ ;  $\vartheta_{m0} = t_{m0} - t_{\Gamma 0}$ .

Действие внутреннего положительного источника теплоты обусловлено поглощением микроволновой энергии влажными частицами, отрицательного источника теплоты – расходом теплоты на испарение влаги.

Как видно из формул, температуры компонентов и темп их изменения по высоте сушилки зависят от физических характеристик, скоростей, температур компонентов на входе, интенсивности межкомпонентного теплообмена, размера частиц, производительности внутренних источников теплоты. В зависимостях (1,2) учитывается уменьшение интенсивности микровол-

новой энергии в слое (и, следовательно, производительности внутреннего положительного источника теплоты  $q_{v1}$ ) по мере удаления от входного сечения, где размещены магнетроны. Согласно экспериментальным данным [2,10], это уменьшение описывается экспоненциальным законом :

$$q_{v1} = q_{v10} \cdot e^{-mx}. \quad (10)$$

В случаях, когда коэффициент ослабления микроволновой энергии мал либо магнетроны размещены по всей высоте сушилки ( $m = 0$ ,  $q_{v1} = \text{const}$ ), зависимости для температур компонентов имеют вид:

$$\vartheta_{\Gamma} = \frac{B_1 \vartheta_{m0}}{P_2} (e^{P_2 x} - 1) + B_1 (H_1 + H_2) \cdot \left( \frac{1}{P_2^2} e^{P_2 x} - \frac{1}{P_2^2} - \frac{x}{P_2} \right), \quad (11)$$

$$\vartheta_m = \vartheta_{\Gamma} + \vartheta_{m0} e^{P_2 x} + \frac{H_1 + H_2}{P_2} (e^{P_2 x} - 1). \quad (12)$$

В одном и том же сечении при  $x = \text{idem}$  температуры компонентов различны, их разность определяется выражениями:

при  $m \neq 0$

$$\vartheta_m - \vartheta_r = \vartheta_{m0} \cdot e^{P_2 x} + \frac{H_1}{m - P_2} (e^{mx} - e^{P_2 x}) + \frac{H_1}{P_2} (1 - e^{P_2 x}), \quad (13)$$

при  $m = 0$

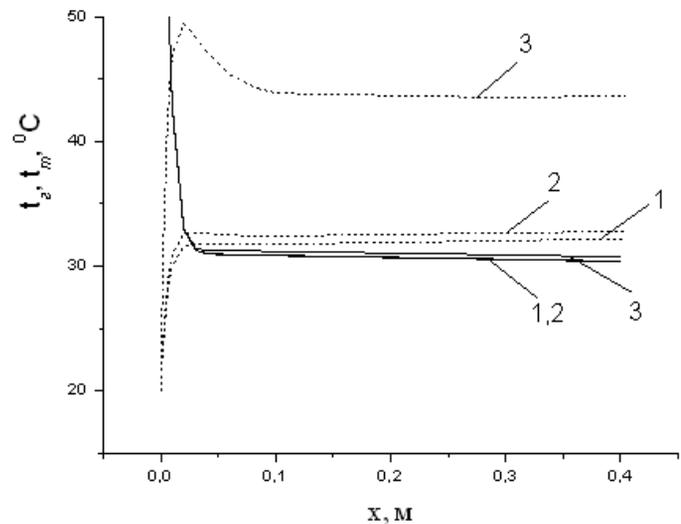
$$\vartheta_m - \vartheta_r = \vartheta_{m0} e^{P_2 x} + \frac{H_1 + H_2}{P_2} (e^{P_2 x} - 1). \quad (14)$$

Она возрастает с увеличением разности температур на входе, размера частиц, уменьшением интенсивности межкомпонентного теплообмена. По приведенным зависимостям были рассчитаны распределения температур в слое гречихи, пшеницы, овса, ячменя при различных значениях производительности внутренних источников теплоты ( $q_{v1} = 10^4 \dots 10^6 \text{ Вт/м}^3$ ,  $q_{v1} = -10^4 \dots -10^5 \text{ Вт/м}^3$ ), скорости сушильного агента ( $w_r = 0,02 \dots 2 \text{ м/с}$ ), скорости слоя ( $w_r = 0,5 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ ), коэффициента ослабления интенсивности микроволновой энергии в слое ( $m = -30; -6; 0$ ).

Скорость сушки, необходимую для расчета  $q_{v1}$  (см. формулу 9), определяли по рекомендациям [10], коэффициент ослабления микроволновой энергии в слое – по экспериментальным данным [11]. На рис. 1 представлены кривые изменения температур компонентов в слое гречихи при следующих исходных данных:  $t_{r2} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{m0} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $d = 0,004 \text{ м}$ ,  $u_0 = 0,2 \text{ кг/кг}$ .

Как видно из графика, на начальном участке температура газа уменьшается, а температура частиц возрастает в результате межкомпонентного теплообмена. При  $x = \text{idem}$  с увеличением значения  $q_{v1_0}$  температуры обоих компонентов незначительно возрастают. При  $x > 0,06 \text{ м}$  температура частиц убывает, т.к. из-за существенного ослабления потока микроволновой энергии в слое значение  $q_{v1}$  резко уменьшается и большее влияние оказывает отрицательный источник  $q_{v2}$ . При уменьшении коэффициента ослабления  $m$  тем-

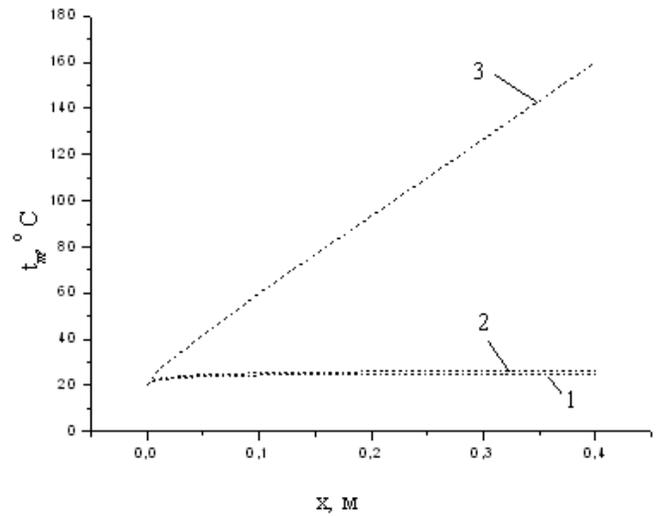
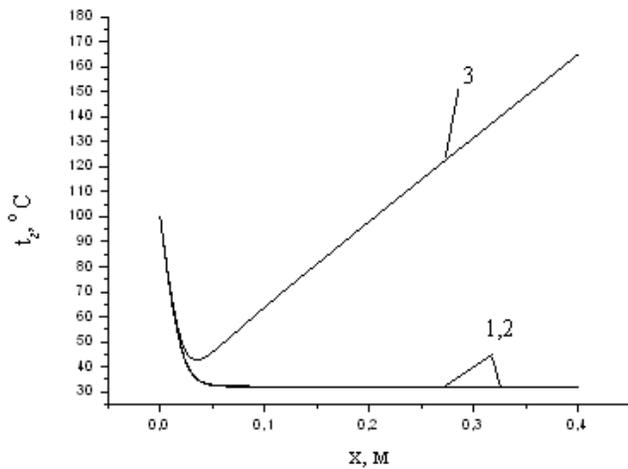
пература газа снижается медленнее, а температура частиц растет быстрее (рис. 2, кривые 1,2).



**Рис. 1. Изменение температур компонентов по высоте сушилки при различных производительностях положительного источника теплоты:**

$w_r = 0,2 \text{ м/с}$ ;  $w_m = 0,001 \text{ м/с}$ ;  $q_{v2} = -10^5 \text{ Вт/м}^3$ ;  
 1 –  $q_{v1_0} = 10^4 \text{ Вт/м}^3$ ; 2 –  $q_{v1_0} = 10^5 \text{ Вт/м}^3$ ;  
 3 –  $q_{v1_0} = 10^6 \text{ Вт/м}^3$ ; --- частицы; — газ.

При  $m = 0$  (т.е.  $q_{v1} = \text{const}$ ) наблюдается существенное повышение температур компонентов по высоте сушилки. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что при сушке материалов с высокими коэффициентами ослабления сосредоточенный подвод микроволновой энергии во входном сечении неэффективен, необходимо



а

б

**Рис. 2. Изменение температур газа (а) и частиц (б) по высоте сушилки при различных коэффициентах ослабления микроволновой энергии в слое:**

$$q_{v1_0} = 10^4 \text{ Вт/м}^3; q_{v2} = -10^5 \text{ Вт/м}^3; w_r = 0,2 \text{ м/с}; w_m = 0,001 \text{ м/с};$$

$$1 - m = -30; 2 - m = -6; 3 - m = 0.$$

обеспечить ее равномерный подвод на участке постоянной скорости сушки, размещая магнетроны по высоте сушилки. Далее приводятся результаты расчета при  $m = 0, q_{v1} = \text{const}$ .

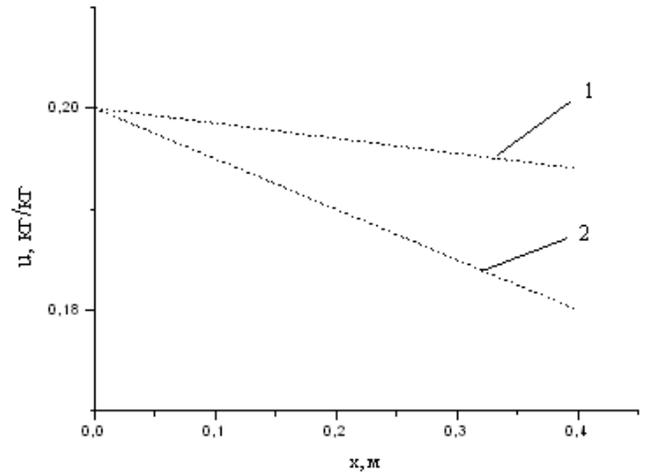
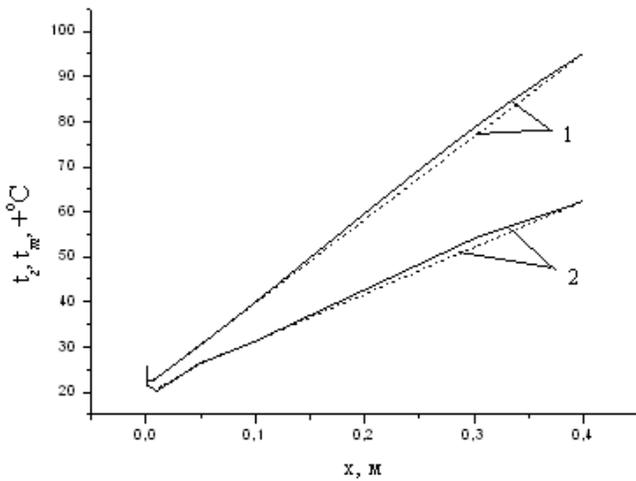
На рис. 3 представлено изменение по высоте сушилки температур компонентов и влажностей гречихи и кукурузы, для которых при одинаковых мощностях магнетрона ( $q_{v1} = \text{idem}$ ) скорости сушки и, следовательно, значения  $q_{v2}$ , различны. При  $q_{v1} = 10^5 \text{ Вт/м}^2$  для гречихи  $du/d\tau = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ,  $q_{v2} = -5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3$ , для кукурузы  $du/d\tau = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ,  $q_{v2} = -10^4 \text{ Вт/м}^3$ . Как видно из рис. 3, а, температуры газа и частиц при сушке гречихи ниже, чем при сушке кукурузы в связи с большим влагосъемом и расходом теплоты на испарение влаги: при высоте сушилки 0,4 м влагосодержание гречихи уменьшилось на 0,02 кг/кг, кукурузы – на 0,006 кг/кг (рис. 3, б).

С увеличением скорости (и, следовательно, водяного эквивалента) газа, его температура на

начальном участке понижается медленнее, а температура частиц растет быстрее в связи с увеличением коэффициента межкомпонентного теплообмена и температурного напора. По всей высоте сушилки температуры компонентов выше, чем при малых скоростях (рис. 4, кривые 1,2).

Чем выше скорость слоя, тем медленнее растет его температура и тем ниже температуры обоих компонентов во всех сечениях (рис. 5, кривые 1,2).

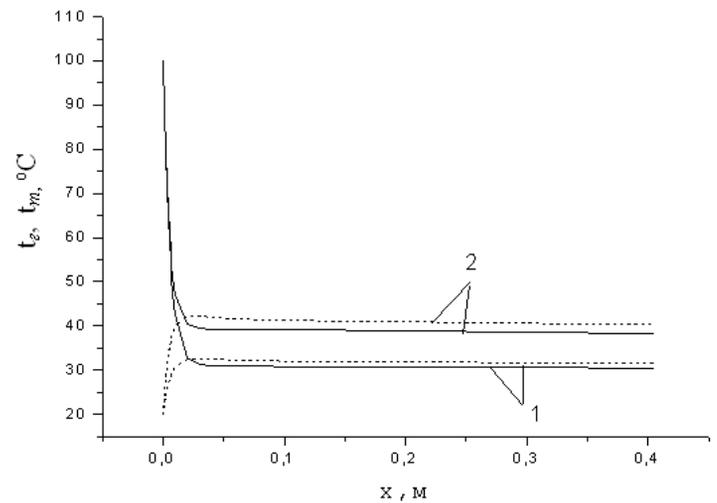
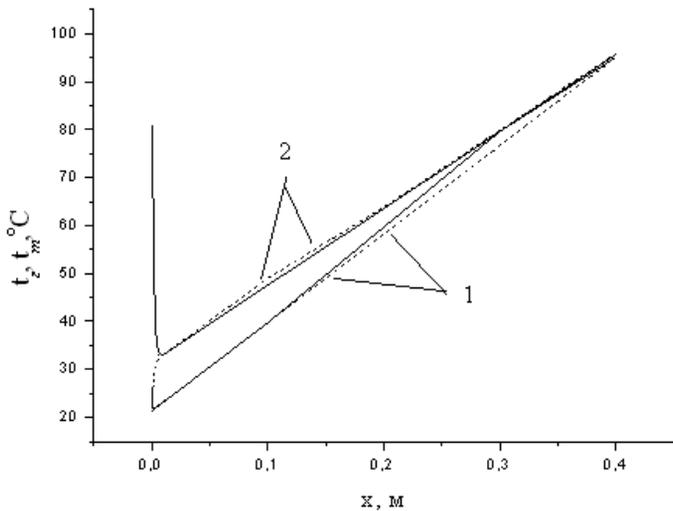
При  $x = \text{idem}$  разность температур компонентов растет с уменьшением скорости газа и увеличением размера частиц в связи с возрастанием термического сопротивления межкомпонентного теплообмена. Для всех указанных выше зерновых культур результаты расчетов аналогичны. На начальном участке газ охлаждается, а частицы нагреваются, темп их изменения определяется главным образом интенсивностью межкомпонентного теплообмена. На некотором расстоянии от входного сечения



*a*

*б*

**Рис. 3.** Изменение температур компонентов (а) и влагосодержания (б) по высоте сушилки при различных производительностях отрицательного источника теплоты:  $q_{v1} = 10^5 \text{ Вт/м}^3$ ,  $w_r = 0,2 \text{ м/с}$ ;  $w_m = 0,001 \text{ м/с}$ . 1 – кукуруза:  $q_{v2} = -5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3$ , 2 – гречиха:  $q_{v2} = -10^4 \text{ Вт/м}^3$ ; ----- частицы; — газ.



**Рис. 4.** Изменение температур компонентов по высоте сушилки при различных скоростях газа: 1 –  $w_r = 0,2 \text{ м/с}$ ; 2 –  $w_r = 2 \text{ м/с}$ ;  $q_{v1} = 10^5 \text{ Вт/м}^3$ ,  $q_{v2} = -10^4 \text{ Вт/м}^3$ ,  $w_m = 0,001 \text{ м/с}$ .  
----- частицы; — газ.

**Рис. 5.** Изменение температур компонентов по высоте сушилки при разных скоростях слоя:  $q_{v1} = 10^4 \text{ Вт/м}^3$ ,  $q_{v2} = -10^5 \text{ Вт/м}^3$ ,  $d=0,004 \text{ м}$ ,  $w_r = 0,2 \text{ м/с}$ , 1 –  $w_{сл} = 10^{-3} \text{ м/с}$ , 2 –  $w_{сл} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ .  
--- частицы; — газ.

различие между температурами компонентов становится незначительным, на темп и характер их дальнейшего изменения основное влияние оказывает производительность внутренних источников теплоты. При достаточно высоких значениях  $q_{v,l}$  температура частиц превышает температуру газа, направление теплового потока изменяется.

Приведенные зависимости позволяют определить для конкретного материала оптимальные режимные параметры, обеспечивающие высокую скорость сушки при допустимых температурах и высокое качество высушенного материала.

### Выводы

1. Зависимости (1, 2, 11, 12), полученные на основе гомогенной двухкомпонентной модели теплопереноса, описывают распределение температур газового и твердого компонентов в плотном движущемся слое дисперсного материала при микроволново-конвективной сушке. Они учитывают влияние на температурное поле свойств компонентов, их скоростей, входных температур, производительностей положительного и отрицательного внутренних источников теплоты, коэффициента ослабления интенсивности микроволновой энергии в слое, интенсивности межкомпонентного теплообмена, размера частиц.

2. Проведенные по этим зависимостям расчеты для различных зерновых культур позволили оценить влияние указанных факторов в широком диапазоне их изменения на поле температур.

3. Использование приведенных зависимостей при расчетах микроволново-конвективных сушилок с плотным движущимся слоем позволяет выбрать для конкретного материала рациональные режимные параметры, которые обеспечивают высокую скорость сушки при температурном режиме, необходимом для получения высококачественного продукта.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Календерьян В.А., Волгушева Н.В. Ма-

тематическая модель процесса сушки дисперсных материалов в движущемся плотном слое при комбинированном подводе теплоты // Придніпровський науковий вісник. – 1998. – №108 (175). – С. 11–16.

2. Волгушева Н.В. Кінетика сушіння щільного шару дисперсного матеріалу (на прикладі гречки) при різних способах підведення теплоти // Автореф. канд. дис. – Одеса, 2005. – 12с.

3. Рудобаўта С.Н. Осциллирующие режимы в технике сушки некоторых растительных материалов // Тезисы докладов и сообщений. VI Минский международный форум по тепло-массообмену. – Минск. – 2008. – С. 36–37.

4. Mujumdar Arun S. Some recent developments in drying technologies appropriate for postharvest processing // Int. J. Postharvest Technology and Innovation. – 2006. – Vol. 1, No.1. – P. 77–92.

5. Askari G.R., Emam-Djomeh Z., Mousavi S.M. Effects of Combined Coating and Microwave Assisted Hot-air Drying on the Texture, Microstructure and Rehydration Characteristics of Apple Slices // Food Science and Technology International. – 2006. – No. 12(1). – P.39–46.

6. Chatterjee A., Basak T., Ayappa K.J. Analysis of microwave sintering of ceramics // AIChE Journal. – 1998. — Vol.44, No. 10. – P. 2301–2311.

7. Haghi A.K., Ghanadzadeh H. Experimental Study on Combined Infrared and Microwave Drying of Porous Media with Particular Application in Wood Industry // Int. J. of Applied Mechanics and Engineering. – 2006. – Vol. 11, No.4. – P.985–991.

8. Календерьян В.А., Волгушева Н.В., Бошкова И.Л. Математические модели теплопереноса в процессе сушки дисперсных материалов в плотном движущемся слое при различных способах подвода теплоты // Холодильна техніка і технологія. – 2008. – № 11(11). – С. 65–68.

9. Календерьян В.А., Волгушева Н.В., Бошкова И.Л. Температурное поле в движущемся плотном слое дисперсного материала при

микроволново-конвективной сушке // VI Минский международный форум по тепло- и массообмену. Минск, 19-23 мая 2008 г. – Т. 2. – С. 206–207.

10. *Календерьян В.А., Волгушева Н.В., Бошкова И.Л.* Кинетика микроволновой сушки зерновых культур // VI Минский международный форум по тепло- и массообмену. Минск, 19-23

мая 2008 г. – Т. 2. – С. 204–205.

11. *Календерьян В.А., Волгушева Н.В., Бошкова И.Л.* Исследование кинетики сушки крупы гречихи в микроволновом электромагнитном поле // ИФЖ. – 2006. – Т. 79, №3. – С. 123–127.

*Получено 13.10.2009 г.*