

Литература

1. Острик А.С. Использование нетрадиционного сырья в кондитерской промышленности [Текст]: Справочник // Острик А.С., Дорохович А.Н., Мироненко Н.В. – К.: Урожай. – 1989.
2. Лурье И. С. Технология кондитерского производства [Текст] / И. Лурье. – М.:Агропромиздат, 1992. – 399 с.
3. Рецептуры на торты, пирожные, кексы и рулеты: в 3 ч. Ч. III. Пирожные, кексы, рулеты, полуфабрикаты [Текст] / Под ред. Л.М. Богатой. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 297 с.
4. Лабораторный практикум з технології хлібопекарського та макаронного виробництв [Текст]/ В.І. Дробот, Л.Ю. Арсеньєва, Д.А.Білик, В.Ф. Доценко [та інш.]; під ред. В.І. Дробот. – К.: Центр навчальної літератури, 2006. – 341 с.
5. Ермаков А.И. Методы биохимического исследования растений [Текст]/ А.И. Ермаков, В.В.Арасимович - Л.: Агропромиздат. - 1987. - 430 с.
6. Романова С. В., Ковальов С. В. Кількісне визначення фенольних сполук [Текст]// Вісник фармації. – 2009. – № 2. – С. 24 – 26.
7. Кузнецов О.А., Волошин Е.В., Сагитов Р.Ф. Реология пищевых масс [Текст]: Учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 106 с.

УДК 664.723:3.036.282

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ ДЛЯ МИКРОВОЛНОВО-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В ДВИЖУЩЕМСЯ СЛОЕ

Календерьян В.А., д-р тех. наук, профессор, Бошкова И.Л., канд. техн. наук, доцент
Волгушева Н.В., канд. техн. наук, ассистент, Дементьева Т.Ю., аспирант
Одесская государственная академия холода, г. Одесса

Приведены схема, методика и результаты расчетов установки для микроволново-конвективной сушки зерновых культур в движущемся плотном слое. Проанализировано влияние скорости слоя и температуры сушильного агента на габариты, удельный влагосъем и удельные энергозатраты. Характеристики слоя сопоставлены с данными для конвективных сушилок.

The scheme, technique and results of calculations of installation for microwave-convective drying of grain crops in a moving dense bed are resulted. Influence of speed of a layer and temperature the drying agent on dimensions and specific power inputs is analysed. Layer characteristics are compared with the data for convective dryers.

Ключевые слова: скорость сушки, удельный влагосъем, удельные энергозатраты, влагосодержание, температура, сушилка.

В настоящее время для сушки зерновых наиболее распространены конвективные сушилки, имеющие ряд существенных недостатков, которые могут быть частично устранены при микроволново-конвективном подводе теплоты. Исследования МВ-конвективной сушки картофеля [1] показали, что энергозатраты и длительность процесса сушки при дополнительном микроволновом энергоподводе сокращаются на 30 % раза по сравнению с конвективной сушкой. При исследовании кинетики сушки зерна гречихи [2] получены убедительные доказательства применимости микроволновых технологий и целесообразности разработок микроволновых сушилок. В [3] подчеркивается эффективность микроволновой обработки для сушки семенного зерна. При сушке зерна в МВ поле удачно сочетаются процессы удаления влаги и дезинсекции, дезинфекции [4]. Внутренние источники теплоты, создаваемые при МВ-нагреве, приводят к повышению температуры и давления внутри зерна и к значительному ускорению перемещения влаги изнутри зерен к их поверхности [5]. При конвективной, как и при кондуктивной сушке температура на поверхности зерен выше, чем внутри, градиенты температуры, и, соответственно, давления препятствуют перемещению влаги к поверхности. Нагрев в МВ поле производит обратное действие: температура внутри зерен становится выше, чем на поверхности, и градиенты температуры и давления содействуют перемещению влаги к поверхности, а одновременная продувка через слой сушильного агента – ее интенсивному испарению. В результате скорость сушки существенно увеличивается. Однако данные по кинетике микроволново-конвективной сушки зерновых культур в литературе практически отсутствуют. В данной статье приведены результаты вариантных расчетов установки для МВ-конвективной сушки зерновых культур на примере ячменя и овса и анализируется влияние скорости слоя

и температуры сушильного агента на скорость сушки, удельный объемный влагосъем, удельные энергозатраты и габариты основных элементов установки.

Схема установки приведена на рис. 1 [6]. Она содержит засыпной бункер 1, установленный над шахтной сушилкой. По обе стороны сушилки расположены отсеки 3, 4, в которых размещены МВ модули 5, состоящие из магнетронов 6, волноводов 7 и антенных излучателей 8. Отсеки МВ модулей сделаны влагонепроницаемыми и отделены от внутреннего пространства сушилки 2 радиопрозрачной перегородкой 9. Тепловой режим МВ модулей обеспечивается принудительным воздушным охлаждением. Под сушилкой расположен контактный охладитель 10 высушенного материала, под ним – выпускное устройство 11 для регулирования производительности и обеспечения движения материала в виде плотного слоя. В засыпном бункере размещен рекуперативный трубчатый подогреватель 12 влажного материала. Охладитель, сушилка и рекуперативный подогреватель соединены между собой системой воздухопроводов для последовательной продувки через них воздуха вентилятором 13. В средней части сушилки и охладителя выполнен вертикальный канал 14 для отвода воздуха из охладителя в сушилку. Через жалюзи 15 и 16 воздух из канала 14 поступает в слой, который перемещается соответственно в левой 17 и правой 18 секциях сушилки, продувает его в горизонтальном направлении и через жалюзи 19 и 20 отводится в воздухопроводы 21 и 22. Затем воздух поступает в воздухопровод 23 и дальше – в рекуперативный подогреватель. Из сушилки высушенный материал перемещается вниз в охладитель, где осуществляется продувка через него воздуха из окружающей среды. В охладитель воздух поступает через диффузоры 24 и 25, и жалюзи 26 и 27 соответственно, продувает материал, и через жалюзи 28 и 29 отводится к вертикальный канал, откуда попадает в сушилку. Из охладителя материал поступает вниз в выпускное устройство и оттуда в нижний бункер (условно не показан).

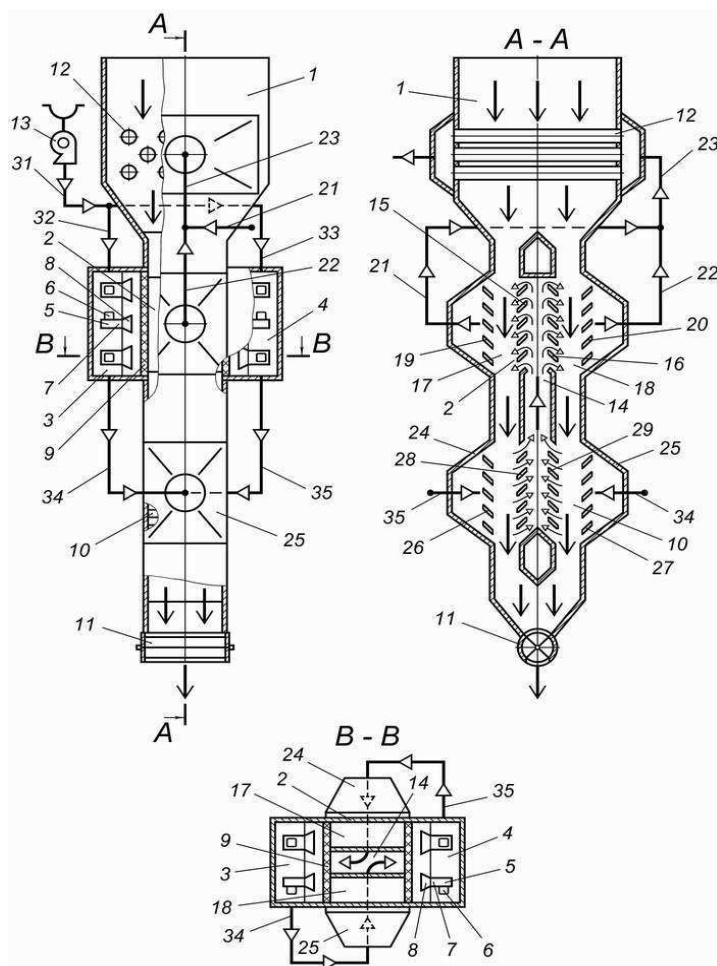


Рис. 1 – Установка для микроволново-конвективной сушки дисперсных материалов в плотном движущемся слое

Для оценки характеристик установки разработаны методика и программа ее расчета [7], выполнены варианты расчеты. В методике использованы эмпирические формулы для скорости микроволново-конвективной сушки, обобщенные зависимости, описывающие изменение среднеинтегральных влагосодержаний материала в процессе сушки [2, 8, 9], а также аналитические зависимости для распределения температур компонентов по высоте сушилки [10-12].

Исходные данные, необходимые для расчета установки:

род материала;

род сушильного агента;

производительность установки по влажному материалу G_m , кг/с;

влагосодержание материала на входе u_0 и на выходе u_k из сушилки, кг/кг;

температура материала на входе в установку t_{m1} , °С;

максимально допустимая температура материала t_{max} , °С;

температуры сушильного агента на входе в охладитель t_{e1} , °С.

Следует задаться следующими величинами:

температурой материала на выходе из охладителя t_{m3} , на входе в сушилку (на выходе из охладителя)

t_{m0} , на выходе из сушилки t_{m2} , °С;

скоростью движения слоя материала в сушилке w_m , м/с;

плотностью приведенного теплового потока q_n , Вт/кг;

температурой сушильного агента (воздуха) на выходе из охладителя t_{e0} , °С.

Расчет целесообразно вести методом последовательных приближений в следующей последовательности.

Определить тепловой поток, который необходимо отвести от высушенного материала в охладителе

$$Q_{охл} = G_m \frac{1+u_k}{1+u_0} c_m (t_{m2} - t_{m3}), \text{ Вт} \quad (1)$$

Определить расход охлаждающего воздуха

$$G_e = \frac{Q_{охл}}{\bar{c}_{pe}(t_{e0} - t_{e1})}, \text{ кг/с} \quad (2)$$

Определить площадь поперечного сечения сушилки

$$f = \frac{G_m}{\rho_m(1-\varepsilon)w_m}, \text{ м}^2 \quad (3)$$

Определить скорость воздуха в сушилке, число Рейнольдса

$$w_e = \frac{G_e}{\bar{\rho}_e f}, \text{ м/с}, \quad Re = \frac{w_e d}{\nu} \quad (4)$$

Найти скорость сушки в периоде постоянной скорости по принятому значению плотности приведенного теплового потока $q_n = \frac{Q_n}{M}$:

$$N_1 = 1,57 \cdot 10^{-7} (q_n)^{1,17} (1 + 0,006 Re)(t_{e1}/t_{e0}), \text{ с}^{-1} \quad (5)$$

Рассчитать безразмерный комплекс $A = N_1 \tau / u_0$ из обобщенного уравнения для влагосодержания, найдя предварительно

$$U_k = \frac{u_k}{u_0} : U_k = 1,016 - 0,332A - 1,449A^2 + 1,091A^3 \quad (6)$$

Найти необходимое время сушки τ :

$$\tau = \frac{A u_0}{N_1}, \text{ с} \quad (7)$$

Определить высоту и объем сушилки

$$h = w_m \tau, \text{ м} \quad (8) \quad V_c = f \cdot h, \text{ м}^3 \quad (9)$$

Найти массу материала в сушилке $M = \rho_m(1-\varepsilon)V_c$, кг (10)

Рассчитать полезный тепловой поток, подведенный к материалу в сушилке от магнетронов:

$$Q_n = G_m \bar{c}_m (t_{m2} - t_{m0}) + \frac{G_m r}{1+u_0} (u_0 - u_k) \quad (11)$$

Найти значение производительности положительного источника теплоты в слое, обусловленного поглощением МВ энергии влажным материалом:

$$q_{v1} = Q_n / V_c, \text{ Вт/м}^3 \quad (12)$$

Найти плотность приведенного теплового потока $q_n = Q_n / M$ и сравнить с принятым, в случае расхождения перезадаваться значением q_n и повторять расчет до достижения удовлетворительного согласования.

Найти значение производительности отрицательного источника теплоты в слое, обусловленного испарением влаги, из формулы:

$$q_{v2} = -N_1 \cdot r \cdot [\rho_m(1 - \varepsilon) / (1 + u_0)], \text{ Вт/м}^3 \quad (13)$$

Найти распределение температур твердого (частиц) и газового (воздуха) компонентов по высоте сушилки, в том числе в выходном сечении (при $x=h$), приняв $q_{v1} = const$

$$\vartheta_z = \frac{B_1 \vartheta_{m0}}{P_2} (e^{P_2 x} - 1) + B_1 (H_1 + H_2) \cdot \left(\frac{1}{P_2^2} e^{P_2 x} - \frac{1}{P_2^2} - \frac{x}{P_2} \right) \quad (14)$$

$$\vartheta_m = \vartheta_z + \vartheta_{m0} e^{P_2 x} + \frac{H_1 + H_2}{P_2} (e^{P_2 x} - 1) \quad (15)$$

$$B_1 = \frac{\alpha_m a}{\rho_z c_{pz} \varepsilon w_z}, \text{ м}^{-1}, \quad B_2 = \frac{\alpha_m a}{\rho_m c_m (1 - \varepsilon) w_m}, \text{ м}^{-1} \quad (16)$$

$$H_1 = \frac{q_{v1}}{\rho_m c_m (1 - \varepsilon) w_m}, \text{ К/м}; \quad H_2 = \frac{q_{v2}}{\rho_m c_m (1 - \varepsilon) w_m}, \text{ К/м} \quad (17)$$

$$P_2 = -(B_1 + B_2) \quad (18) - \text{корень характеристического уравнения}$$

Здесь: $\vartheta_z = t_z - t_{z0}$; $\vartheta_m = t_m - t_{z0}$; $\vartheta_{m0} = t_{m0} - t_{z0}$ – избыточные температуры компонентов.

Сравнить полученные в результате расчетов значения температур компонентов на выходе из сушилки с принятыми. При неудовлетворительном согласовании перезадаваться этими значениями и повторять расчет до тех пор, пока не будет достигнута нужная сходимость.

Определить влагосъем $\Delta G_{вл} = \frac{G_m}{1 + u_0} (u_0 - u_k), \text{ кг/с} \quad (19)$

Определить суммарную мощность магнетронов, удельный объемный влагосъем и удельный расход теплоты на 1 кг испаренной влаги:

$$P = Q_n / (\eta_k \eta_m), \text{ Вт} \quad (20)$$

здесь η_k, η_m – кпд сушильной камеры и магнетрона.

$$G_{вл}^{y\partial} = G_{вл} / V_c, \text{ кг/(м}^3\text{с)} \quad (21)$$

$$Q_{y\partial} = P / G_{вл}, \text{ Дж/кг} \quad (22)$$

Расчеты рекуперативного подогревателя 12 и контактного охладителя 10 проводились по рекомендациям [13].

В расчетах варьировались значения скорости движения материала от 0,5 до 1,5 мм/с, температуры продуваемого воздуха на входе в сушилку – от 20 до 50 °С. Ниже приведены результаты вариантных расчетов установки для сушки овса производительностью $G_m = 0,3 \text{ кг/с}$ при следующих исходных данных: $u_0 = 0,2 \text{ кг/кг}$, $u_k = 0,14 \text{ кг/кг}$, $t_{m1} = 15 \text{ °С}$, $t_{max} = 60 \text{ °С}$, $t_{z1} = 20 \text{ °С}$, сушильный агент – воздух.

С увеличением скорости слоя при $G_m = idem$ уменьшается поперечное сечение сушилки и время пребывания в ней материала. Для обеспечения времени, необходимого для достижения заданного конечного влагосодержания, приходится увеличивать высоту. В связи с уменьшением сечения сушилки возрастает скорость воздуха в слое, что приводит к незначительной интенсификации процесса сушки и росту удельного влагосъема. Удельные энергозатраты практически не зависят от скорости слоя. Значение w_m следует выбирать таким, чтобы было обеспечено рациональное соотношение размеров поперечного сечения и высоты сушилки. Для повышения температуры воздуха на входе в сушилку (т.е. на выходе из охладителя высушенного материала) необходимо снизить его расход через охладитель (при $Q_{охл} = idem$), что приводит к уменьшению скорости в слое. При уменьшении скорости продуваемого воздуха скорость сушки снижается, при повышении его температуры – возрастает. Противоположное влияние указанных факторов обеспечивает незначительный рост скорости сушки, уменьшение высоты и объема сушилки,

увеличение удельного влагосъема (рис.2а,б). Удельные затраты энергии тем больше, чем выше температура воздуха на входе в сушилку (рис. 2в).

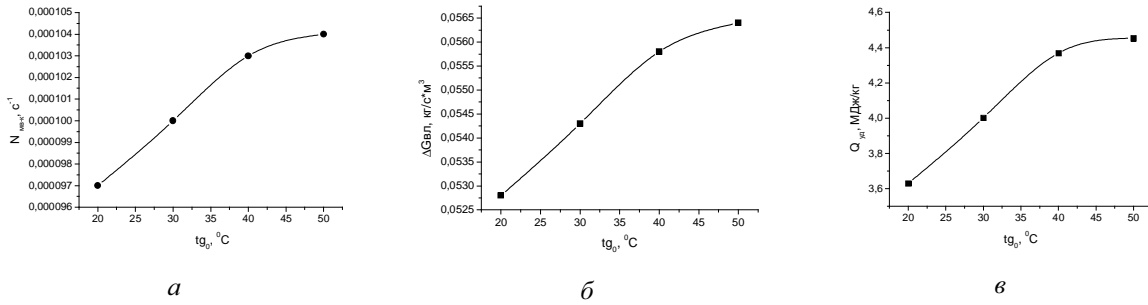


Рис. 2 – Зависимость скорости сушки (а), удельного влагосъема (б), удельных затрат теплоты на сушку (в) от температуры воздуха

На рис. 3 представлено изменение влагосодержания зерна и температур зерна и воздуха. Как видно из рис. 3а, влагосодержание изменяется по линейному закону, т.е. процесс удаления влаги протекает в периоде постоянной скорости сушки. На входном участке температура зерна падает, а воздуха возрастает в связи с межкомпонентным теплообменом, затем их изменение определяется соотношением производительностей положительного (q_{v1}) и отрицательного (q_{v2}) внутренних источников теплоты.

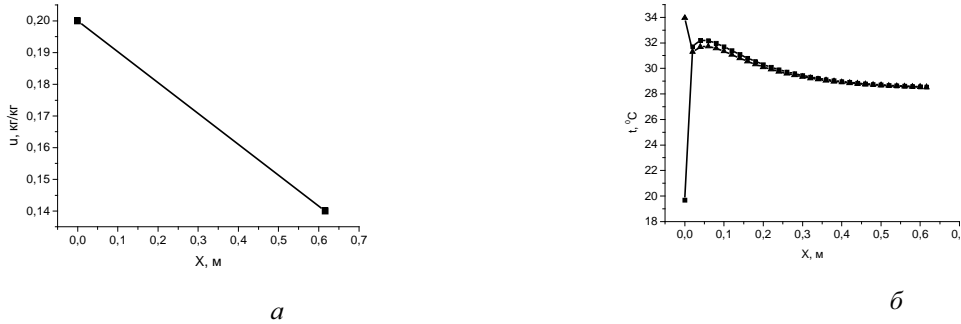


Рис. 3 – Изменение влагосодержания зерна по высоте сушилки (а), температуры воздуха ■ и зерна ▲ по высоте сушилки (б). $w_m = 1$ мм/с, $t_{z0} = 20$ °С

Анализ результатов расчетов, полученных при постоянном расходе зерна $G_m = idem$ и при постоянной разности начального и конечного влагосодержания зерна $u_0 - u_k = idem$, показал, что увеличение скорости движения зерна в 3 раза приводит к такому же увеличению высоты сушилки и уменьшению ее площади поперечного сечения при постоянстве объема $V = idem$. Изменение скорости движения зерна не оказывает влияния на необходимую мощность, подводимую от магнеронов, в также на удельный влагосъем. С увеличением температуры растут удельные затраты энергии (приблизительно на 20%), при этом скорость сушки и удельный влагосъем растут незначительно. Рациональным сочетанием варьируемых параметров являются следующие: скорость движения зерна 1 мм/с, температура продувающего воздуха на входе в сушилку 30 °С.

При этих параметрах температуры материала и воздуха на выходе из сушилки $t_{m2} = 40$ °С, $t_{z2} = 39,9$ °С, высота сушилки 0,63 м, ее объем – 0,29 м³, удельный объемный влагосъем 0,0543 кг/(м³с), удельный расход энергии на 1 кг испаренной влаги 4,002 кДж/кг; площадь поверхности рекуперативного теплообменника 3,2 м², поперечное сечение охладителя высушенного материала 1,65 м², толщина слоя 0,04 м, потери давления в слое 165 Па.

В табл. 1 приведены основные характеристики микроволново-конвективной сушилки (МКС), являющейся предметом данной работы, стационарных зерносушилок от компании RIELA (Германия) и сушилки непрерывного действия Mathews Company серия MC-975.

Таблица 1 – Характеристики сушилок

Тип сушилки	Технические характеристики					
	$P_{\text{потр}}$, кВт	$u_0 - u_k$	Объем сушилки, м ³	Производительность по влажному зерну, т/ч	Удельный влагосъем,, (кг/кг)/м ³	Удельный расход теплоты кДж/кг ^{влагги}
МКС	61,23	20-14	0,276	1,08	0,0543	4002
RIELA Alu 240/5/1	419,25	19-15	7,5	6,5	0,0074	7486
МС-975	1163	17-12	25,1	17,5	0,0082	5618,3
СЗЖ-10	913	20-14	12	10	0,042	6476,6
СЗК-15ж	1200	20-14	25	15	0,0083	5169

Как видно из таблицы, удельный влагосъем в микроволново-конвективной сушилке примерно на порядок выше, а удельные затраты энергии на (25 – 50) % ниже, чем в конвективных сушилках.

Литература

1. Рудобашта С.В. Осциллирующие режимы в технологиях сушки некоторых растительных материалов // VI Минский междунар. форум по тепло- и массообмену. Тезисы докладов и сообщений. Минск. – 2008. – Т. 1. – С. 36-37.
2. Волгушева Н.В. Кінетика сушіння щільного шару дисперсного матеріалу (на прикладі гречки) при різних способах підведення теплоти // Автореферат канд. дис. Одеса. – 2005. – 12с.
3. Калинин Л. Г., Сердюк Л. В., Овсянникова Л. К., Орлова С. С. Эффективность использования микроволновой энергии для сушки семенного зерна // Хранение и переработка зерна. – 1999. – №2. – С. 9-10.
4. Юсупова Г. Г. Влияние электромагнитного поля СВЧ на микроскопические грибы и их метаболиты // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. – №12. – С. 67- 69.
5. Mijumdar A. S., Kudra T. Progress in drying technologies.- 2001. – V. 7. – 459 p.
6. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Установка для микроволново-конвективного сушіння дисперсних матеріалів у щільному рухомому шарі. Патент України у 2008 09907 – 2008. – бюлль № 24.
7. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Установка для микроволново-конвективной сушки дисперсных материалов в движущемся слое // Труды Международного научно-технического семинара «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов». – Воронеж. – 2010. – с. 505-514.
8. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Исследование кинетики сушки крупы гречихи в микроволновом электромагнитном поле // ИФЖ. – 2006. – №3. – т. 79. – С.123 – 127.
9. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Температурное поле в движущемся плотном слое дисперсного материала при микроволново-конвективной сушке // VI Минский Межд. Форум по тепло-и массообмену. Минск. – 2008. Тезисы докладов и сообщений. – Т2. – С. 206-207.
10. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Математические модели теплопереноса в процессе сушки дисперсных материалов в плотном движущемся слое при различных способах подвода теплоты // Холодильна техніка і технологія. – 2008. – №11. – С.65-68.
11. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Кинетика микроволновой сушки зерновых культур // VI Минский Межд. Форум по тепло-и массообмену. Минск. – 2008. Тезисы докладов и сообщений. – Т2. – С.204-205.
12. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Влияние режимных параметров на распределение температур в движущемся плотном слое дисперсного материала при микроволново-конвективной сушке // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т.32. – № 1.– С. 37-44.
13. Горбис З.Р., Календерьян В.А. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями. М: Энергия. – 1975. – 296 с.