



## DEFINITION OF RATIONAL PARAMETERS OF MICROWAVE GRAIN DRYING

**Natalya VOLGUSHEVA, Irina BOSHKOVA**

The Department of power engineering and pipeline transport energy carriers  
Institute of Refrigeration, Cryogenic Technologies and Eco Energetic  
Odessa National Academy of Food Technologies

**Abstract** – In drying of grain using a microwave field is formed unidirectional gradients of temperature and pressure in the bed, resulting in a significant acceleration of movement of moisture from the inner layers of the material to the surface. The article presents an analysis of the results of studies of drying of the dense layer of grain materials by different methods of microwave energy supply. Continuous supply of microwave energy leads to rapid heating of the material and the development of impermissibly high temperatures. The pulsing of the microwave heating allows lead the drying process in the soft mode for the grain. The main characteristics of microwave drying and pulsing heat input expedient to compare to the cyclic microwave - convection mode. The feature of this mode is a ventilation layer during periods of pauses. It was found that the optimal is both microwave- convective method of supplying energy, at which appear the maximum rate of drying, the minimum specific energy consumption and material temperature does not exceed the permissible. Convection heating of the layer leads to about the same drying rate as in microwave- convection, but the energy consumption is considerably higher. Microwave heating and microwave- convective heating of the layer is most efficiently.

**Keywords** – drying, grains, efficiency, microwave heating, experiment, dense layer.

## DETERMINAREA PARAMETRILOR RAȚIONALI LA USCAREA CEREALELOR CU MICROUNDRE

**Natalia VOLGUȘEVA, Irina BOȘCOVA**

Departamentul de energie termică și transport prin conducte a resurselor energetice  
Institutul de frig, criotehnologii și ecoenergetică  
Academia națională a tehnologiilor alimentare din Odessa

**Rezumat** – La uscarea cerealelor cu utilizarea energiei câmpului microundelor apar gradienti unidirecționali de temperatură și presiune în stratul, care conduce la accelerarea esențială a umidității din straturile interioare a materialului la suprafață.

Articolul prezintă o analiza a rezultatelor cercetărilor a uscării stratului dens a materialelor cerealelor la diferite metode de apropiere a energiei microundelor. Radierea neîntreruptă conduce la încălzirea rapidă a materialului aflat în uscare și la atingerea temperaturilor inadmisibil de înalte. Încălzirea cu pulsații permite derularea procesului de uscare a grânelor într-un regim mai blând. Caracteristicile de bază a procesului de uscare în regim de pulsații a căldurii este rațional de a fi comparat cu regimul ciclic convectiv cu microunde. Particularitatea acestui regim este ventilarea stratului în perioada de pauză. S-a obținut, că optim este procedeul simultan convectiv cu microunde al apropierii energiei de materialul aflat în uscare, prin care se obține viteza maximă de uscare, consum specific minim de energie și temperatura nu depășește valoarea admisibilă. În cazul încălzirii convective se obține aproape aceeași viteză de uscare ca și în cazul uscării convective cu microunde, dar consumul de energie este mult mai mare. În maximă măsură se utilizează energia în cazul uscării simultane cu microunde și convectivă cu microunde.

**Cuvinte cheie** – uscare, grâne, eficiență, încălzire cu microunde, experiment, strat dens.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОВОЛНОВОЙ СУШКИ ЗЕРНА

**Н.В. Волгушева, И.Л. Бошкова**

Кафедра теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей  
Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики  
Одесская национальная академия пищевых технологий

**Реферат** – При сушке зерна с использованием энергии микроволнового поля возникают однонаправленные градиенты температуры и давления в слое, что приводит к значительному ускорению перемещения влаги из внутренних слоев материала к поверхности.

В статье представлен анализ результатов исследований сушки плотного слоя зерновых материалов при различных способах подвода микроволновой энергии. Непрерывный микроволновой подвод приводит к быстрому разогреву материала и развитию недопустимо высоких температур. Пульсирующий микроволновой нагрев позволяет вести процесс сушки в щадящем для зерна режиме. Основные характеристики сушки при микроволновом и пульсирующем подводе теплоты целесообразно сопоставить с циклическим микроволново-конвективным режимом. Особенностью этого режима является вентиляция слоя в периоды пауз. Получено, что оптимальным является одновременный микроволново-конвективный способ подвода энергии, при котором достигаются максимальная скорость сушки, минимальные удельные затраты энергии и температура материала не превышает допустимую. При конвективном нагреве слоя достигается примерно такая же скорость сушки, как и при микроволново-конвективном, но энергозатраты значительно выше. Наиболее полно энергия используется при микроволновом и одновременном микроволново-конвективном подводе энергии.

**Ключевые слова** – сушка, зерно, эффективность, микроволновой нагрев, эксперимент, плотный слой.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость совершенствования технологии сушки зерна обусловлена значительным объемом материала, большой удельной энергоемкостью процесса и высокими требованиями к сохранению качества конечного продукта. В этом направлении перспективными являются технологии, основанные на применении диэлектрического нагрева в микроволновом поле, что дает определенные преимущества по сравнению с традиционными методами, включающие высокую энергетическую эффективность и интенсификацию процессов переноса теплоты и влаги. Микроволновые технологии относятся к разряду энергосберегающих в силу их естественной специфики, однако для создания эффективного оборудования необходимо проведение комплексных исследований, направленных на определение рациональных условий процесса, при которых также будет достигаться равномерность микроволнового поля, безаварийность и безопасность работы.

Исследованию процессов сушки с использованием микроволнового поля посвящается все больше научных работ. В работе [1] показано, что длительность процесса сушки при наличии осциллирующего микроволнового энергоподвода сокращается в 3,5 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 с дезинсекцией и дезинфекцией [4]. Внутренние источники теплоты, создаваемые при МВ-нагреве, приводят к повышению температуры и давления внутри зерна и к значительному ускорению перемещения влаги из внутренних слоев материала к поверхности [5], что определяет специфику интенсификации процесса при микроволновой сушке. Следует отметить, что при аналитических исследованиях большинство работ как наших, так и зарубежных авторов основываются на моделях А.В. Лыкова [6]. В то же время проведенные по данной тематике исследования не содержат ответа

на ряд вопросов, важных для разработки новых энергосберегающих технологий сушки. Целью данной работы являлось определение рациональных параметров сушки зерна с использованием энергии МВ поля.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная установка представлена на рис.1. Установка обеспечивает проведение исследований при микроволновой, микроволново-конвективной и конвективной сушке. Внутри рабочей камеры установлен воздуховод из радиопрозрачного материала, в который помещалась ячейка, изготовленная в форме параллелепипеда из радиопрозрачного сетчатого материала. В экспериментальную ячейку засыпалось нужное количество материала. Размеры ячейки строго соответствовали размерам воздуховода, с тем, чтобы при продувке материала воздухом не происходило боковых перетечек. Регулировка расхода обеспечивалась шибером, установленным перед рабочей камерой

Опыты при различных способах подвода энергии проводились с одним и тем же материалом (овес с начальным влагосодержанием 20%). Во всех опытах мощность, потребляемая магнетроном от сети  $N_c$ , начальная масса  $m_0$  и влагосодержание  $u_0$  материала, а также размеры и форма образца, помещаемого в микроволновую камеру, одинаковы. Цель исследований – установить, какой способ подвода энергии (микроволновой, микроволново-конвективный, конвективный) и какие режимные параметры обеспечивают высокую интенсивность процесса сушки и необходимое качество готового продукта при минимальных энергозатратах.

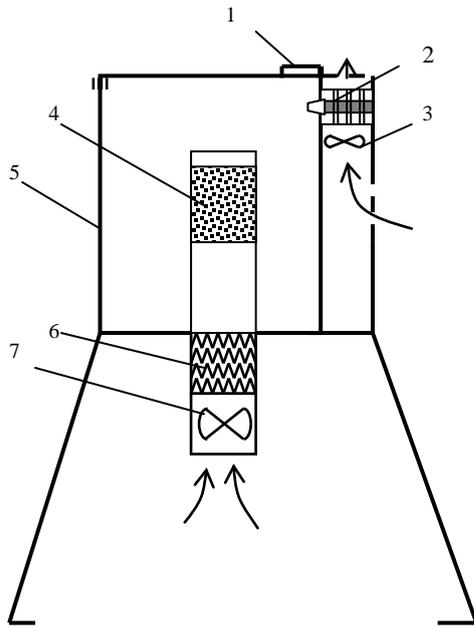


Рис. 1. Схема установки для исследования кинетики сушки зерновых материалов при микроволновом и конвективном нагреве.

1 – дверца, 2 – магнетрон, 3 – вентилятор системы охлаждения магнетрона, 4 – экспериментальная ячейка с материалом для исследований, 5 – рабочая камера, 6 – электронагреватель, 7 – вентилятор.

При пульсирующем режиме периоды микроволнового подвода чередуются с паузами. Изучалось влияние длительности включения магнетрона  $\tau_{MB}$  и пауз  $\tau_n$  на закономерности изменения температур и влагосодержания материала, скорость сушки и удельные энергозатраты. Проводилось 3 серии опытов, различающихся длительностью микроволнового подвода. Каждая серия включала 4-5 опыта с разной длительностью пауз  $\tau_n = \text{var}$  при  $\tau_{MB} = \text{idem}$ . Каждый опыт заканчивался паузой. Количество включений магнетрона и количество пауз во всех опытах одинаково:  $n_{MB} = \text{idem}$ ,  $n_n = \text{idem}$ .

В опытах пошагово измеряли мощность магнетрона, начальную и конечную массы ( $m_0, m_{\text{кон}}$ ), температуры ( $t_0, t_{\text{кон}}$ ), продолжительность и количество включений магнетрона ( $\tau_{MB}, n_{MB}$ ) и пауз ( $\tau_n, n_n$ ). При обработке данных определяли следующие величины:

- убыль влаги

$$\Delta m = m_0 - m_{\text{кон}}, \text{ кг} \quad (1)$$

- начальное и конечное влагосодержание материала

$$u_0 = \frac{m_0}{m_{\text{сух}}}, \quad u_k = \frac{m_{\text{кон}}}{m_{\text{сух}}}, \text{ кг/кг} \quad (2)$$

где  $m_{\text{сух}}$  - масса абсолютно сухого материала,

- общую продолжительность процесса сушки

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{MB} \cdot n_{MB} + \tau_n \cdot n_n, \text{ с} \quad (3)$$

- скорость сушки

$$N = \frac{u_0 - u_{\text{кон}}}{\tau_{\Sigma}}, \text{ с}^{-1} \quad (4)$$

- суммарные энергозатраты

$$Q_{\Sigma} = N_c \cdot \tau_{MB} \cdot n_{MB} \quad (5)$$

- полезный тепловой поток, израсходованный на испарение влаги и нагрев материала:

$$Q_{\text{пол}} = \Delta m \cdot r + \frac{m_0 + m_{\text{кон}}}{2} c_{\text{вл.м}} (t_{\text{кон}} - t_0), \text{ Дж} \quad (6)$$

где  $c_{\text{вл.м}}$  - теплоемкость влажного материала, Дж/(кгК)

- удельные энергозатраты

$$q_{\text{уд}} = \frac{Q_{\Sigma}}{\Delta m}, \text{ Дж/кг.вл} \quad (7)$$

КПД установки, т.е. соотношение полезных и суммарных энергозатрат, позволяющие оценить эффективность использования энергии:

$$\eta = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\Sigma}}, \quad (8)$$

При непрерывном микроволновом подводе проводилось несколько опытов при  $N_c = \text{idem}$ ,  $\tau_{MB} = \text{var}$ .

В каждом опыте измеряли  $m_0, m_k, t_0, t_k, \tau_{MB}$ .

При циклическом режиме периоды микроволнового подвода чередовались с периодами продувки воздухом, нагретым и ненагретым. Изучалось влияние длительности продувки  $\tau_k$ , а также температуры воздуха, продувающего слой, на закономерности изменения температур и влагосодержаний материала, скорость сушки и удельные энергозатраты. При этом длительность включения магнетрона  $\tau_{MB}$  во всех опытах была одинаковой. При продувке ненагретым воздухом проводилось 3 серии опытов, различающихся длительностью  $\tau_k$ . После каждого шага производилось взвешивание материала и измерение температуры слоя в нескольких точках, затем в ячейку засыпалась новая порция материала с тем же весом и влагосодержанием, и опыт проводился с продолжительностью, большей на следующий период (МВ или продувка). Таким образом, полученные исходные данные позволяют определить убыль влаги и среднюю температуру слоя, а также рассчитать влагосодержание, удельные затраты энергии после каждого из периодов. Каждый опыт заканчивался паузой. Количество включений магнетрона и количество пауз во всех опытах одинаково:  $n_{MB} = \text{idem}$ ,  $n_k = \text{idem}$ .

В опытах измеряли мощность магнетрона, начальную и конечную массы ( $m_0, m_{\text{кон}}$ ), температуры ( $t_0, t_{\text{кон}}$ ) и длительность продувки ( $\tau_k$ ). Общая продолжительность процесса сушки определяется зависимостью:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{MB} \cdot n_{MB} + \tau_k \cdot n_n, \text{ с} \quad (9)$$

Суммарные энергозатраты:

$$Q_{\Sigma} = N_c \cdot \tau_{MB} \cdot n_{MB} + N_{\text{вент}} \cdot \tau_{\text{кон}} \cdot n_k \quad (10)$$

В опытах с продувкой нагретым воздухом расчет проводился по приведенной выше методике, однако

суммарные энергозатраты учитывали также количество теплоты, которое было затрачено на нагрев воздуха.

При одновременном микроволново-конвективном подводе изучалось влияние скорости и температуры воздуха, продуваемого через слой, а также времени процесса, на конечное влагосодержание материала и удельные энергозатраты.

Проводилось 3 серии опытов.

1 серия:  $N_M = idem$ ,  $\tau = idem$ ,  $w_B = idem$ ,  $t_B = var$

2 серия:  $N_M = idem$ ,  $\tau = idem$ ,  $t_B = idem$ ,  $w_B = var$

3 серия:  $N_M = idem$ ,  $w_B = idem$ ,  $t_B = idem$ ,  $\tau = var$

Методика расчета соответствует приведенной выше.

При конвективном подводе энергии изучалось влияние температуры воздуха как агента сушки, расхода (скорости) воздуха и длительности процесса сушки на закономерности изменения температур и влагосодержания материала, скорость сушки и удельные энергозатраты. Экспериментальная установка, масса, начальное влагосодержание и вид загружаемого материала были такими же, как и в предыдущих экспериментах:  $m = idem = 100$  г,  $u_0 = idem = 0,2$ .

Проводилось 3 серии опытов:

I серия –  $G_{возд} = idem$ ,  $\tau = idem$ ,  $t_{возд} = var$

II серия –  $t_{возд} = idem$ ,  $\tau = idem$ ,  $G_{возд} = var$

III серия –  $t_{возд} = idem$ ,  $\tau = var$

В опытах измеряли начальную и конечную массы ( $m_0, m_k$ ), температуры ( $t_0, t_k$ ) в конце заданных периодов ( $\tau_{MB}, \tau_n$ ).

Суммарные энергозатраты определяются зависимостью:

$$Q_{\Sigma} = [N_{вент} \cdot n_k + G_e \cdot c_{pe} \cdot (t_B^k - t_{o.c.})] \cdot \tau_k \quad (11)$$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты обработки экспериментальных данных по пульсирующей и непрерывной МВ сушке представлены на рис. 2.

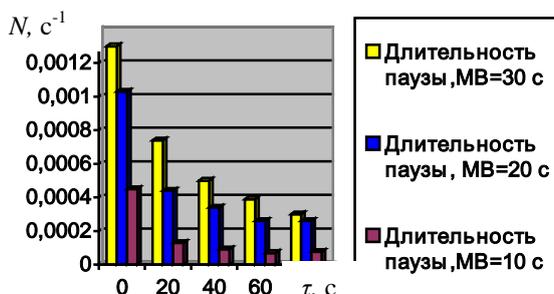


Рис. 2. Сводная номограмма для скорости сушки при трех различных вариантах длительности периода МВ подвода энергии

В соответствии с полученными данными, скорость сушки практически не зависела от длительности пауз. С увеличением длительности паузы отмечается

падение скорости сушки, причем для опыта с длительностью МВ нагрева 30 с влияние длительности паузы более заметно, чем для опытов с длительностью МВ нагрева 10 с. Наибольшая скорость сушки соответствует непрерывному МВ нагреву. По сравнению с непрерывным МВ подводом продолжительностью 30 с, при переходе к пульсирующему режиму наблюдается резкое снижение скорости сушки, при увеличении длительности пауз падение скорости сушки становится незначительным. Уменьшение длительности МВ нагрева приводит к выравниванию скоростей сушки, независимо от длительности паузы. При  $\tau_{MB} = 10$  с наблюдалось незначительное изменение скорости сушки, как и в работе [7]. Увеличение длительности МВ нагрева приводит к росту скорости сушки при уменьшении длительности паузы.

При МВ нагреве с длительностью однократного подвода энергии 10 с (суммарное время – 30 с) влаги удаляется меньше, чем при 20 (суммарное время – 60 с) и 30 (суммарное время – 90 с), при этом отмечается нелинейная зависимость количества удаленной влаги от этой длительности – при увеличении длительности МВ воздействия в 2 раза, влаги удаляется в 4 раза больше, при увеличении в 3 раза – в 7,6 раз. Эти значения существенно зависят от массы, что можно объяснить тем, что при  $\tau_{MB} = 10$  с и массе 100 г сам процесс сушки только начинается, в основном энергия расходуется на нагрев материала; в периоде паузы (отлежки) происходит естественная сушка, но материал теряет столько теплоты, что во время следующего включения магнетрона большой процент энергии также расходуется на нагрев. При увеличении длительности МВ нагрева зерно успевает нагреться до такой температуры, что основная доля энергии идет на испарение влаги.

Увеличение длительности МВ подвода приводит к увеличению температуры материала, влагосъема, скорости сушки и снижению удельных затрат энергии. Особенно резкое изменение наблюдается при переходе от длительности МВ нагрева в 10 с к длительности 20 с., переход от 20 с к 30 с привел к менее значительным изменениям. Эти опыты подтверждают предыдущие эксперименты, когда также отмечался непропорциональный рост скорости сушки при переходе от 10 с к 20 и 30 с.

Получено, что увеличение продолжительности МВ воздействия приводит к увеличению скорости сушки в 1,6 раз, и снижению удельных затрат энергии – в 1,7 раза. Температуры слоя при этом различались незначительно ( $70,3^{\circ}\text{C}$  и  $73,7^{\circ}\text{C}$ ). Отличие наблюдалось в длительности опытов: 90 с - 3 включения магнетрона по 10 с, и 180 с - 6 включений магнетрона по 10 с.

Увеличение времени подвода МВ энергии в 1,5 раза (импульсы по 30 с) приводит к увеличению скорости сушки в 1,2 раза и снижению затрат энергии в 1,4 раза. Температуры слоя при этом были на уровне  $87^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 3 представлено изменение влагосодержания и

температуры во времени, на рис. 4 - скорость сушки в периоды МВ подвода и продувки по циклам. Наличие периодов продувки не оказало существенного влияния на качественный вид кривой влагосодержания, а температурная кривая имеет пульсирующий характер (рис. 3б), максимумы которой соответствуют МВ подводу энергии, а минимумы – продувке. Средняя скорость сушки при замене отлежки продувкой увеличилась приблизительно в 2 раза.

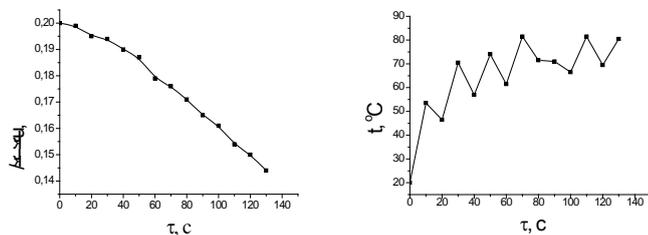


Рис. 3. Кинетика циклической сушки зерна. *а* – изменение влагосодержания, *б* – изменение температуры зерна

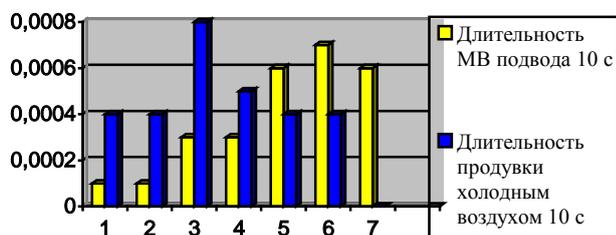


Рис. 4. Скорость сушки при циклическом подводе МВ энергии

Сопоставление данных по скорости сушки при продувке ненагретым воздухом: при длительности МВ нагрева 10 с и длительности продувки 10 с средняя скорость МВ сушки  $N_{MB} = 0,000343 \text{ c}^{-1}$ , средняя скорость в период продувки  $N_{\kappa} = 0,000483 \text{ c}^{-1}$ ; при длительности МВ нагрева 10 с и длительности продувки 20 с  $N_{MB} = 0,000201 \text{ c}^{-1}$ , средняя скорость в период продувки  $N_{\kappa} = 0,000278 \text{ c}^{-1}$ , при длительности МВ нагрева 10 с и длительности продувки 30 с  $N_{MB} = 0,000157 \text{ c}^{-1}$ , средняя скорость в период продувки  $N_{\kappa} = 0,000233 \text{ c}^{-1}$

Во всех этих опытах средняя скорость сушки при продувке выше, чем при МВ нагреве. При этом увеличение длительности продувки приводит к уменьшению скорости сушки как в период МВ подвода, так и в период продувки.

При этом удельные затраты примерно равны. Таким образом, первый режим является предпочтительным.

При сушке нагретым воздухом получено: для длительности МВ нагрева 10 с и длительности продувки 10 с средняя скорость МВ сушки  $N_{MB} = 0,000257 \text{ c}^{-1}$ , средняя скорость в период продувки  $N_{\kappa} = 0,000533 \text{ c}^{-1}$ ; при длительности МВ нагрева 10 с и длительности продувки 20 с средняя

скорость МВ сушки  $N_{MB} = 0,000124 \text{ c}^{-1}$ , средняя скорость в период продувки  $N_{\kappa} = 0,000432 \text{ c}^{-1}$ . Т.к. скорость сушки в первом случае была выше, а удельные затраты ниже, то этот режим является предпочтительным.

В табл. 1 приведены данные по сушке при режимах, обеспечивающих наиболее благоприятные характеристики процесса. Для обеспечения эффективности сопоставления все исследования проводились в идентичных условиях: на одной и той же установке (рис. 1), с одной и той же зерновой культурой (овес), с начальным влагосодержанием 0,2 кг/кг, с образцами одинаковых размеров (сечение слоя 50x50 мм, высота слоя 57мм) и массой 100 г.

Таблица 1 - Характеристики процессов сушки при разных способах подвода энергии

Вид и режим подвода энергии	$N, \text{c}^{-1}$	$t_{\text{кон}}, \text{°C}$	$Q_{\text{уд}}, \text{МДж/кг}$
МВ непрерывный $\tau_{\Sigma} = 30 \text{ с},$ $N_c = 600 \text{ Вт}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	81,7	15,79
МВ-пульсирующий $\tau_{\Sigma} = 120 \text{ с},$ $\tau_{MB} = \tau_n = 20,$ $n = 3$ $N_c = 600 \text{ Вт}.$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	80,3	8,13
МВ-конвективный, циклический $\tau_{\Sigma} = 130 \text{ с},$ $\tau_{MB} = \tau_{\kappa} = 10 \text{ с},$ $\tau_{\Sigma\kappa} = 60 \text{ с},$ $\tau_{\Sigma MB} = 70 \text{ с},$ $n = 6,5, t_B = 20 \text{ °C},$ $w_B = 1 \text{ м/с}.$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	80,5	9,07
МВ-конвективный, одновременный $\tau_{\Sigma} = 60 \text{ с},$ $t_B = 19 \text{ °C},$ $w_B = 0,9 \text{ м/с}$	$12,7 \cdot 10^{-4}$	71	5,65
Конвективный $\tau_{\Sigma} = 180 \text{ с},$ $w_B = 1,5 \text{ м/с},$ $t_B = 120 \text{ °C}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	77	34,82

Анализ таблицы позволяет сделать следующие выводы относительно целесообразности выбора способа сушки:

1. Оптимальным является одновременный МВ-конвективный способ подвода энергии, при котором достигаются максимальная скорость сушки,

минимальные удельные затраты энергии и температура материала не превышает допустимую.

2. Характеристики режима при циклическом МВ-конвективном подводе соответствуют характеристикам режима при пульсирующем МВ-подводе, однако установка усложняется из-за необходимости организации продувки.

3. Непрерывный МВ подвод обеспечивает такую же скорость сушки, как и пульсирующий, но при более высоких удельных затратах.

4. При конвективном подводе достигается примерно такая же скорость сушки, как и при микроволново-конвективном, но энергозатраты значительно выше.

5. Наиболее полно энергия используется при одновременном микроволново-конвективном подводе энергии.

Продувка через слой сушильного агента одновременно с объемным МВ нагревом интенсифицирует межкомпонентный тепло- и массообмен, ускоряет испарение влаги, перемещающейся из объема зерен к их поверхности. В результате существенно (почти втрое) возрастает скорость сушки, снижается продолжительность процесса и удельные энергозатраты (примерно на 40 %). В таком случае усложнение установки за счет системы транспорта и подогрева воздуха вполне оправдано.

## 7. СИМВОЛЫ И АББРЕВИАТУРА

$G$  - расход, кг/с;

$Q$  - тепловой поток, Вт;

$m$  - масса материала, кг;

$u$  - влагосодержание, кг/кг;

$t$  - температура,

°С;  $\tau$  - время, с;

$\eta$  - коэффициент полезного действия;

$r$  - удельная теплота парообразования, Дж/кг;

$c_p$  - удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кгК);

$\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  - скорость, м/с;

$N$  - скорость сушки, с<sup>-1</sup>.

МВ - микроволновое.

Индексы: М – магнетрон, уд - удельная; кон – конечная; к – конвективный;  $u$  – испарение; в – воздух, вент – вентилятор,  $n$  – пауз; 0 – начальное значение.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление основных характеристик (скорости сушки, температур материала, удельных затрат энергии, эффективности использования подведенной энергии) процессов сушки при различных способах подвода энергии свидетельствует о том, что оптимальным является одновременный МВ-

конвективный способ подвода, при котором скорость сушки примерно втрое выше, а удельные энергозатраты на 40% ниже, чем при пульсирующем МВ подводе. При конвективном подводе может быть достигнута такая же скорость сушки, как при пульсирующем МВ, вчетверо большем расходе энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Gumasekaran. *Grain drying using continuous and pulsed microwave energy*, Drying Technology, 1990, 8(5), pp. 1039–1047.
- [2] В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева. *Исследование кинетики сушки крупы гречихи в микроволновом электромагнитном поле*, ИФЖ, 2006, №3, т. 79, с. 123 - 127.
- [3] Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева. *Влияние микроволнового электромагнитного поля на семена агрокультур*, Материалы научно-практической конференции Комплексное использование биоресурсов: малоотходные технологии, Краснодар, 11-12 марта, 2010, с. 74-78.
- [4] Л.Г. Калинин, В.П. Тучный, Е.А. Левченко и др. *Предпосевная обработка микроволновым полем здоровых и зараженных фитопатогенами семян озимой пшеницы как фактор повышения урожайности*, Журн. Хранение и переработка зерна, 2001, № 8, С. 23-28.
- [5] *Advances in Agricultural Science and Technology*. Volume 1. *Advances in Bioprocessing Engineering*, Editors H. Yang, J. Tang. London: World Scientific, 2002, 172 p.
- [6] А.В. Лыков. *Теория сушки*, М.: Энергия, 1968, 472с.

## АВТОРЫ

**Волгушева Наталья Викторовна.** Родилась в г. Одессе, 14.10.1975. Закончила Одесскую государственную академию холода в 1997 г. по специальности теплофизика. В 2005 г. защитила кандидатскую диссертацию по теме «Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты», специальность 05.14.06 «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». Доцент каф. теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей Одесской национальной академии пищевых технологий, ст. научн. сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории, работает с 2006 г. над выполнением научных проектов, связанных с исследованием процессов сушки с использованием энергии микроволнового поля.

**Бошкова Ирина Леонидовна.** Родилась в г. Одессе, 06.09.1959. Закончила Одесский технологический институт холодильной промышленности в 1981 г. по специальности теплофизика. В 1995 г. защитила кандидатскую диссертацию по теме «Термоакустические явления при кипении недогретой жидкости в парогенерирующих каналах РЭА», специальность 05.14.06 «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». В 2015 г. защитила докторскую диссертацию на тему «Интенсификация процессов тепломассопереноса в растительных материалах при действии микроволнового электромагнитного поля», специальность 05.14.06 «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». Доцент каф. теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей Одесской национальной академии пищевых технологий, ведущий научн. сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории, работает с 2006 г. над выполнением научных проектов, связанных с исследованием процессов термообработки материалов растительного происхождения с использованием энергии микроволнового поля.