

И. Л. Бошкова  
Н. В. Волгушева  
И. И. Мукминов  
О. С. Бондаренко

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУШКИ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ

Одесская национальная академия пищевых технологий

Отмечается, что микроволновой нагрев при сушке способен привести к существенному сокращению затрат энергии. Микроволновую сушку целесообразно применять в диапазоне влагосодержаний, характерных для зерновых. Определено, что существенными сдерживающими факторами применения методов микроволнового нагрева является недостаточная полнота теоретических и экспериментальных исследований. Работа проведена с целью установления рационального способа микроволнового нагрева. Исследования проводились на экспериментальной установке, позволяющей реализовывать различные способы подвода теплоты при сушке зерновых. Установка обеспечивает проведение исследований при микроволновой, микроволново-конвективной и конвективной сушке. Эксперименты проводились с плотным слоем зерен овса при фиксированном начальном влагосодержании. По результатам всех опытов получена зависимость безразмерного влагосодержания от безразмерной скорости сушки. Сравнение сушки при микроволновом и при микроволново-конвективном подводе показало, что увеличение скорости продуваемого воздуха и его температуры способствует увеличению скорости сушки. Представлена обобщающая эмпирическая зависимость, которая позволяет оценить влияние скорости воздушного потока и его температуру на скорость сушки, которая осуществляется при использовании микроволнового нагрева. Проведено сопоставление скорости сушки и удельных затрат энергии при различных способах подвода теплоты. Получено, что оптимальным является одновременный МВ-конвективный способ подвода энергии, при котором достигаются максимальная скорость сушки, минимальные удельные затраты энергии и температура материала не превышает допустимую.

**Ключевые слова:** микроволновой нагрев, конвективный, влагосодержание, скорость сушки, удельные затраты энергии

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование сушки при микроволновом нагреве показывает возможность существенного сокращения затрат энергии [1]. Микроволновой нагрев в режимах сушки демонстрирует существенную интенсификацию процесса [2]. При увеличении выходной мощности магнетрона в 4 раза длительность сушки снижается примерно в 5 раз. Однако в работе не приводится анализ влияния вида материала и объема загрузки на необходимые характеристики, такие как длительность обработки и выходная мощность магнетрона. Продолжаются исследования микроволновой сушки фруктов и овощей [2, 3], однако сушка сырья с высоким влагосодержанием не представляется целесообразной. Это приводит к потере качества и большим затратам энергии, поскольку основным веществом, поглощающим электромагнитную энергию, является вода. Микроволновая сушка зерновых, уровень влагосодержания которых составляет 20-22 %, является перспективной. На примере исследования кинетики сушки крупы гречихи в микроволновом электромагнитном поле показано, что кривые сушки содержат периоды, наблюдаемые при других способах подвода теплоты [4].

Особое внимание уделяется изучению температурного поля в материале для установления рациональных режимов [5, 6]. Большое значение имеет анализ неоднородности нагрева, что вызвано формой материала и его составом, а также неоднородным распределением электромагнитного поля в микроволновой камере [6].

Анализ литературных данных позволяет сделать следующий вывод. Существенными сдерживающими факторами применения методов микроволнового нагрева является недостаточная

полнота теоретических и экспериментальных исследований. Недостаток данных не позволяет прогнозировать эффекты, возникающие в материале под действием микроволнового поля.

*Цель исследований* – установить, какой способ подвода энергии (микроволновой, микроволново-конвективный, конвективный) и какие режимные характеристики обеспечивают высокую интенсивность процесса сушки и необходимое качество готового продукта при минимальных энергозатратах.

### Результаты исследования

Для достижения поставленной цели проводились эксперименты при различных режимах. При обработке опытных данных определялись закономерности изменения среднеинтегральных влагосодержаний и температур, скорость сушки, затраты энергии на 1 кг испаренной влаги.

Экспериментальная установка представлена на рис. 1.

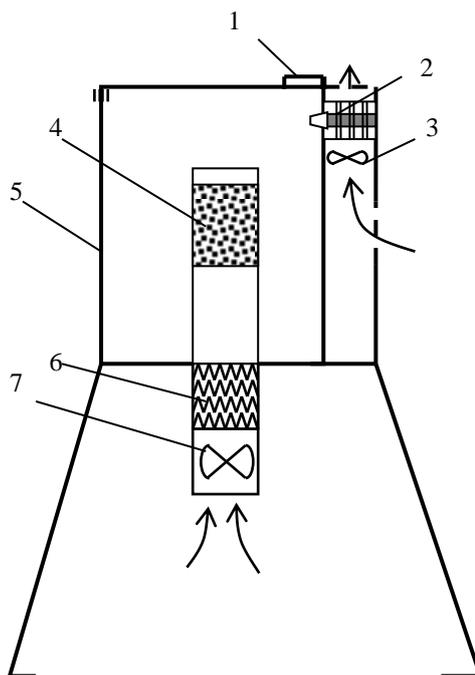


Рис. 3.1. Схема установки для исследования кинетики сушки зерновых материалов при микроволновом и конвективном нагреве.

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

Установка обеспечивает проведение исследований при микроволновой, микроволново-конвективной и конвективной сушке. Внутри рабочей камеры установлен воздухопровод из радиопрозрачного материала, в который помещалась ячейка, изготовленная в форме параллелепипеда из полиэтиленовой сетки. В экспериментальную ячейку засыпалось нужное количество зерна. Размеры ячейки строго соответствовали размерам воздуховода, с тем, чтобы при продувке материала воздухом не происходило боковых перетечек.

Установка работает следующим образом. При исследовании микроволновой сушки зерно помещается в ячейку и закладывается в микроволновую камеру. Включается магнетрон 2 и по секундомеру отслеживается заданное время экспозиции. Затем магнетрон отключается, ячейка с зерном изымается и взвешивается на электронных весах. Измеряется температура в нескольких точках по толщине слоя.

При исследовании микроволново-конвективной сушки включается магнетрон и вентилятор 3, который продувает воздух через слой зерна. Для исследования микроволново-конвективной сушки нагретым воздухом совместно с вентилятором 7 включается нагреватель 6 с регулируемой мощностью, который обеспечивает нагрев воздуха до требуемой температуры. При исследовании конвективной сушки магнетрон не включается, через слой продувается воздух заданной температуры и с заданным расходом.

Опыты при различных способах подвода энергии проводятся с одним и тем же материалом. Во всех опытах мощность, потребляемая магнетроном из сети, начальная масса и влагосодержание материала, а также размеры и форма образца, помещаемого в микроволновую камеру, одинаковы.

Исследование кинетики сушки проводилось на следующих режимах: пульсирующий и непрерывный микроволновой подвод энергии, микроволново-конвективный подвод, циклический и непрерывный, и конвективный. При пульсирующем режиме периоды микроволнового подвода чередуются с паузами. Изучается влияние длительности включения магнетрона  $\tau_{MB}$  и пауз  $\tau_n$  на закономерности изменения температур и влагосодержания материала, скорость сушки и удельные энергозатраты.

В опытах измеряют мощность магнетрона, начальные и конечные массы ( $m_0$ ) и температуры ( $t_0$ ) и продолжительность и количество включений магнетрона ( $\tau_{MB}$  и  $n_{MB}$ ) и пауз ( $\tau_n$ ). При обработке данных определяют следующие величины:

- убыль влаги:

$$\Delta m = m_0 - m_k \quad (1)$$

- начальное и конечное влагосодержание материала:

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

где  $m_{сух}$  — масса абсолютно сухого материала,

- общую продолжительность процесса сушки:

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

- скорость сушки:

$$N = \frac{u_0 - u_k}{\tau_{\Sigma}}, \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)} \quad (4)$$

- суммарные энергозатраты:

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

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

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

где  $c_{вл.м}$  — теплоемкость влажного материала, Дж/(кг·К)

- удельные энергозатраты:

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

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

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

- суммарные энергозатраты:

$$Q_{\Sigma} = [P_{вент} \cdot n_k + G_e \cdot c_{pe} \cdot (t_B^k - t_{о.с.})] \cdot \tau_k, \text{ Дж} \quad (9)$$

По результатам всех опытов получают уравнения для безразмерных влагосодержания и температуры.

Обработка результатов всех экспериментов, приведенных в данной главе, в безразмерных координатах  $\frac{u}{u_0} = f\left(\frac{N\tau}{u_0}\right)$ , представлена на рис. 2. Видно, что все точки укладываются на одну линию, т.е. независимо от способа и режима подвода энергии, безразмерное влагосодержание однозначно определяется комплексом  $\frac{N\tau}{u_0}$ . Пунктирной линией представлена зависимость, полученная ранее [5]. Можно отметить вполне приемлемую корреляцию между этими

зависимостями. Однако погрешность экспериментов в данной работе была существенно меньше, что позволяет считать полученную зависимость более точной.

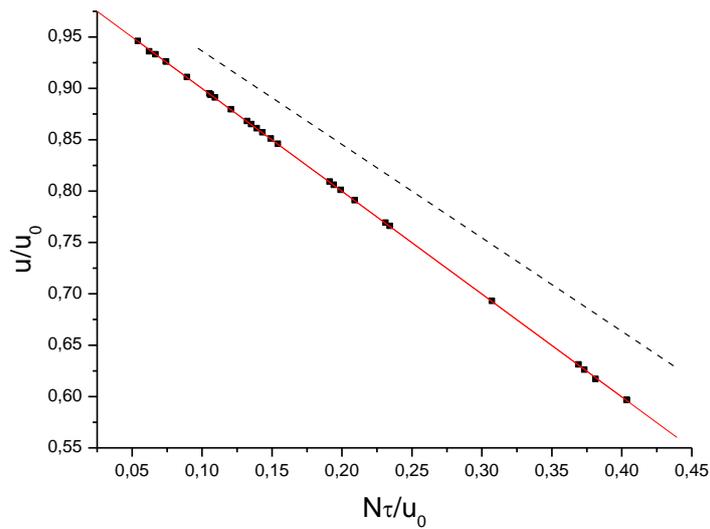


Рис. 2. Обобщающая зависимость безразмерного влагосодержания от комплекса  $\frac{N\tau}{u_0}$  для различных способах подвода теплоты.

Линейная зависимость может быть представлена формулой (10):

$$\frac{u}{u_0} = 1 - \frac{N\tau}{u_0} \quad (10)$$

Сравнение сушки при микроволновом и при микроволново-конвективном подводе показывает, что увеличение скорости продуваемого воздуха и его температуры способствует увеличению скорости сушки. Этот результат отражается зависимостью, которая обобщает соответствующие экспериментальные данные:

$$\frac{N_{\text{МВ-К}}}{N_{\text{МВ}}} = 1 + 0,0003937 \text{Re}^{0,799} \left( \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{о.с.}}} \right)^{1,037} \quad (11).$$

Здесь где  $N_{\text{МВ-К}}$  – скорость сушки при микроволново-конвективном подводе энергии,  $N_{\text{МВ}}$  при микроволновом подводе,  $t_{\text{в}}$  температура воздуха, продуваемого сквозь слой материала,  $t_{\text{о.с.}}$  температура окружающей среды.

Формула справедлива с погрешностью 5,7 % при числах Рейнольдса до  $\text{Re} = 4500$  температурах вентилирующего воздуха в пределах  $t_{\text{в}} = 19 \text{--} 20$

В табл. 1 приведены данные по сушке при режимах, обеспечивающих наиболее благоприятные характеристики процесса.

Таблица 1

**Характеристики процессов сушки при разных способах подвода энергии**

Режим	Вид и режим подвода энергии	Скорость сушки, кг/(кг·с)	Удельные затраты энергии, МДж/кг
1	МВ непрерывный	$4,5 \cdot 10^{-4}$	15,79
2	МВ-пульсирующий	$4,4 \cdot 10^{-4}$	8,13
3	МВ-конвективный, циклический	$4,3 \cdot 10^{-4}$	9,07
4	МВ-конвективный, одновременный	$12,7 \cdot 10^{-4}$	5,65
5	Конвективный	$4,1 \cdot 10^{-4}$	34,82

Приведенные выше данные были получены на одном виде зерновых материалов (овес).

## Выводы

Оптимальным является одновременный МВ-конвективный способ подвода энергии, при котором достигаются максимальная скорость сушки, минимальные удельные затраты энергии и температура материала не превышает допустимую.

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

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

Продувка через слой сушильного агента одновременно с объемным МВ нагревом интенсифицирует межкомпонентный тепло- и массообмен, ускоряет испарение влаги, перемещающейся в результате термодиффузии 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] P. Rattanadecho, N. Makul. Microwave-Assisted Drying: // A Review of the State-of-the-Art. – 2016. – Vol. 34 (1). – P. 1-38.
- [2] Babak Mohammadi<sup>1</sup>, Shahrzad Busaleyki<sup>1</sup>, Rosa Modarres<sup>1</sup>, Ehsan Yarionsorudi<sup>1</sup>, Mehrdad Fojlaley<sup>2</sup>. Sasan Andik. Investigation of microwave application in agricultural production drying // International Journal of Technical Research and Applications. – 2014. – Vol.-2, Iss. 1, – P. 69-72.
- [3] Dadali G, Demirhan E, Özbek B, Belma Oezbek. Microwave heat treatment of spinach: drying kinetics and effective moisture diffusivity // Dry Technol. – 2007. – Vol.25, Iss. 10. – P. 1703–1712.
- [4] V.A. Kalender'yan, I.L. Boshkova N.V. Volgusheva. Kinetics of microwave drying of a free-flowing organic material // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2006. – Vol. 79, No.3. – P. 111-113.
- [5] 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.
- [6] Hao Feng, Yun Yin Juming Tang. Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling // Food Engineering Reviews. – 2012. – Vol. 4, Iss. 2, – P. 89–106.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв ОНАХТ

**Бошкова Ирина Леонидовна** – д-р техн. наук, профессор кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей института холода, криотехнологии и экоэнергетики имени В. С. Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса; тел. 096-3316521; e-mail: [boshkova.irina@gmail.com](mailto:boshkova.irina@gmail.com)

**Волгушева Наталья Викторовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей института холода, криотехнологии и экоэнергетики имени В. С. Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса; тел. 067-1139646, [natvolgusheva@gmail.com](mailto:natvolgusheva@gmail.com).

**Мукминов Игорь Игоревич** – аспирант кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей института холода, криотехнологии и экоэнергетики имени В. С. Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса; тел. 067 – 1870963; e-mail: [fatalrew@gmail.com](mailto:fatalrew@gmail.com).

**Бондаренко Оксана Станиславовна** - аспирант кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей института холода, криотехнологии и экоэнергетики имени В. С. Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса; тел. 098 – 4539556, [boshkova.irina@gmail.com](mailto:boshkova.irina@gmail.com)

**I. L. Boshkova  
N. V. Volgusheva  
I. I. Mukminov  
O. S. Bondarenko**

## **Experimental researches of drying of grain materials at various method of heat supply**

**Odessa National Academy of Food Technologies**

It is noted that microwave heating during drying can lead to a significant reduction in energy costs. Microwave drying is advisable to apply in the range of moisture content characteristic of cereals. It is determined that the insufficient completeness of theoretical and experimental studies is a significant limiting factor in the application of microwave heating methods. The work was carried out in order to establish a rational method of microwave heating. The studies were carried out on an experimental installation, which allows implementing various methods of supplying heat during drying of grain crops. The installation provides research during microwave, microwave-convective and convective drying. The experiments were carried out with a dense layer of oat grains with a fixed initial moisture content. According to the results of all experiments, the dependence of the dimensionless moisture content on the dimensionless drying rate was obtained. Comparison of drying with microwave and microwave convective heating showed that an increase in the speed of the air and its temperature contributes to an increase in the drying speed. A generalizing empirical dependence is presented, which allows one to evaluate the effect of the air flow rate and its temperature on the drying rate, which is carried out using microwave heating. A comparison is made of the drying rate and specific energy consumption for various methods of supplying heat. It was found that the simultaneous MW-convective method of supplying energy is optimal, in which the maximum drying speed, the minimum specific energy consumption and the temperature of the material do not exceed the permissible.

**Keywords: microwave heating, convective, moisture content, drying speed, specific energy consumption.**

**Boshkova Irina Leonidovna** – dr. tech. sciences, Professor of Department of Power Engineering and Pipeline Transport of Energy, Odessa National Academy of Food Technologies, 096-3316521, e-mail: [boshkova.irina@gmail.com](mailto:boshkova.irina@gmail.com)

**Volgusheva Natalya Viktorovna** – PhD, Associate Professor, Department of Power Engineering and Pipeline Transport of Energy, Odessa National Academy of Food Technologies, 067-1139646, [natvolgusheva@gmail.com](mailto:natvolgusheva@gmail.com).

**Mukminov Igor Igorevich** – graduate student, Department of Power Engineering and Pipeline Transport of Energy, Odessa National Academy of Food Technologies, 067 – 1870963; e-mail: [fatalrew@gmail.com](mailto:fatalrew@gmail.com)

**Bondarenko Oksana Stanislavovna** – graduate student, Department of Power Engineering and Pipeline Transport of Energy, Odessa National Academy of Food Technologies, 098 – 4539556, [boshkova.irina@gmail.com](mailto:boshkova.irina@gmail.com)

**І. Л. Бошкова  
Н. В. Волгушева  
І. І. Мукмін  
О. С. Бондаренко**

## **Експериментальні дослідження сушіння зернових матеріалів при різних способах підведення теплоти**

**Одеська національна академія харчових технологій**

Відзначається, що мікрохвильовий нагрів при сушінні здатний привести до істотного скорочення витрат енергії. Мікрохвильову сушку доцільно застосовувати в діапазоні вологовмісту, характерному для зернових. Визначено, що істотними стримуючими факторами застосування методів мікрохвильового нагріву є недостатня повнота теоретичних і експериментальних досліджень. Робота проведена з метою встановлення раціонального способу мікрохвильового нагріву. Дослідження проводилися на експериментальній установці, що дозволяє реалізувати різні способи підведення теплоти при сушінні зернових. Установка забезпечує проведення досліджень при мікрохвильовому, мікрохвильово-конвективному і конвективному сушінні. Експерименти проводилися з щільним шаром зерен вівса при фіксованому початковому вологовмісті. За результатами всіх дослідів отримана залежність безрозмірного вологовмісту від безрозмірної швидкості сушіння. Порівняння сушки при мікрохвильовому і при мікрохвильово-конвективному підводі показало, що збільшення швидкості повітря, що продувається, і його температури сприяє збільшенню швидкості сушіння. Представлена узагальнююча емпірична залежність, яка дозволяє оцінити вплив швидкості повітряного потоку і його температури на швидкість сушіння, яка здійснюється при використанні мікрохвильового нагрівання. Проведено зіставлення швидкості сушіння і питомих витрат енергії при різних способах підведення теплоти. Отримано, що оптимальним є одночасний МХ-конвективний спосіб підведення енергії, при якому досягаються максимальна швидкість сушіння, мінімальні питомі витрати енергії і температура матеріалу не перевищує допустиму.

**Ключеві слова: мікрохвильовий нагрів, конвективний, вологовміст, швидкість сушіння, питомі витрати енергії**

**Бошкова Ірина Леонідівна** - д-р техн. наук, професор кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв інституту холоду, кріотехнології і екоенергетика імені В. С. Мартинівського Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, тел. 096-3316521, e-mail: [boshkova.irina@gmail.com](mailto:boshkova.irina@gmail.com).

**Волгушева Наталя Вікторівна** - канд. техн. наук, доцент кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв інституту холоду, кріотехнології і екоенергетика імені В. С. Мартинівського Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, 067-1139646, [natvolgusheva@gmail.com](mailto:natvolgusheva@gmail.com).

**Мукмінов Ігор Ігорович** – аспірант кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв інституту холоду, кріотехнології і екоенергетика імені В. С. Мартинівського Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, 067 – 1870963; e-mail: [fatalrew@gmail.com](mailto:fatalrew@gmail.com).

**Бондаренко Оксана Станіславівна** – аспірант кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв інституту холоду, кріотехнології і екоенергетика імені В. С. Мартинівського Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, 098 – 4539556, [boshkova.irina@gmail.com](mailto:boshkova.irina@gmail.com)