

## РОЗДІЛ 3

ХОЛОДИЛЬНІ  
ТА СУПУТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 664.732

**Н. В. Волгушева** 

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная 112, Одесса, 65039, Украина

✉ e-mail: n-volgusheva@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>**КИНЕТИКА СУШКИ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ**

*В работе приведены результаты исследования кинетики сушки плотного слоя зерновых материалов в микроволновом поле. Показано, что изменения влагосодержания и температуры во времени соответствуют кривым, характерным для сушки коллоидных капиллярно-пористых тел при других способах подвода теплоты. Данные по скорости сушки для всех исследованных материалов обобщены единой зависимостью. Представленный в работе комплекс эмпирических формул позволяет проводить расчеты влагосодержания и температуры в зависимости от заданной выходной мощности магнетрона, массы загрузки и времени. Определено, что скорость сушки в микроволновом поле существенно превышает значения, получаемые при других способах подвода теплоты.*

**Ключевые слова:** Микроволновая сушка – Влагосодержание – Температура – Полезный тепловой поток – Скорость сушки

**Н. В. Волгушева**

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна 112, Одеса, 65039, Україна

**КИНЕТИКА СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ**

*У роботі наведені результати дослідження кінетики сушіння щільного шару зернових матеріалів в мікрохвильовому полі. Показано, що зміни вмісту вологи і температури протягом часу відповідають кривим, характерним для сушіння колоїдних капілярно-пористих тіл при інших способах підведення теплоти. Дані по швидкості сушки для всіх досліджених матеріалів узагальнені єдиної залежністю. Представлений в роботі комплекс емпіричних формул дозволяє проводити розрахунки вмісту вологи і температури в залежності від заданої вихідної потужності магнетрону, маси завантаження і часу. Визначено, що швидкість сушіння в мікрохвильовому полі істотно перевищує значення, одержувані при інших способах підведення теплоти.*

**Ключові слова:** Мікрохвильова сушка – Влагосодержание – Температура – Корисний тепловий потік – Швидкість сушіння



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

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

**I. ВВЕДЕНИЕ**

Важнейшей и наиболее энергоемкой технологической операцией при послеуборочной обработке зерновых является тепловая сушка. К настоящему времени сушке подвергают 70 – 90% всего заготовленного зерна [1]. Наиболее распространенные для сельскохозяйственной продукции конвективные сушилки морально устарели, пути совершенствования их конструктивных и технологических особенностей потенциально себя исчерпали. Вследствие этого направления исследований сконцентрировались на разработке и внедрении других способов сушки [2–4]. Фундаментом для конструирования новых установок являются данные по температуре и влагосодержанию дисперсного материала в процессе сушки, а также экспериментально определенные требования

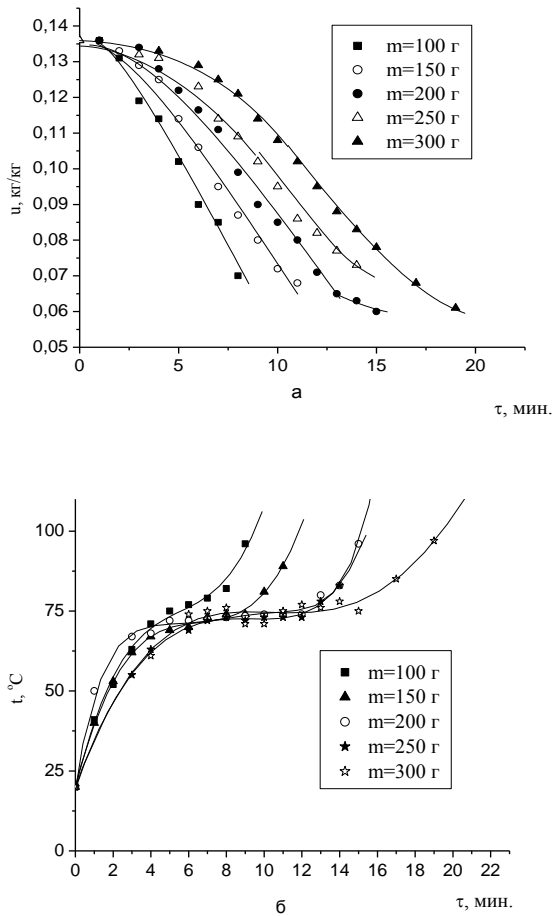
к геометрическим характеристикам слоя и режимным параметрам процесса.

**II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

В данной работе исследовалась сушка зерна гречихи, ячменя, овса и пшеницы в микроволновом поле. Начальное влагосодержание зерна изменялось от 20% до 43%, начальная температура – от 17 до 26 °С, масса – от 0,05 до 1,2 кг, толщина слоя – от 0,008 до 0,07 м, площадь поверхности образца, открытой для удаления влаги – от  $8 \cdot 10^{-3}$  до  $94 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, мощность магнетрона от 80 до 800 Вт, при этом полезная мощность в условиях эксперимента была порядка 10 – 250 Вт.

Вид кривых изменения влагосодержания и температуры показал, что процесс сушки можно разде

лить на периоды, характерные для коллоидных капиллярно-пористых тел при других способах подвода теплоты [5]: прогрева, постоянной и падающей скорости сушки, либо: нулевой, первый и второй. В период прогрева испарение влаги почти не происходило (влажность оставалась практически постоянным), а температура быстро повышалась. Затем, при некотором значении температуры материала, начинало уменьшаться влагосодержание, причем это изменение можно считать линейным. На рисунке 1 представлены характерные экспериментальные зависимости влагосодержания и температуры от длительности сушки в микроволновом поле при различной массе загрузки.

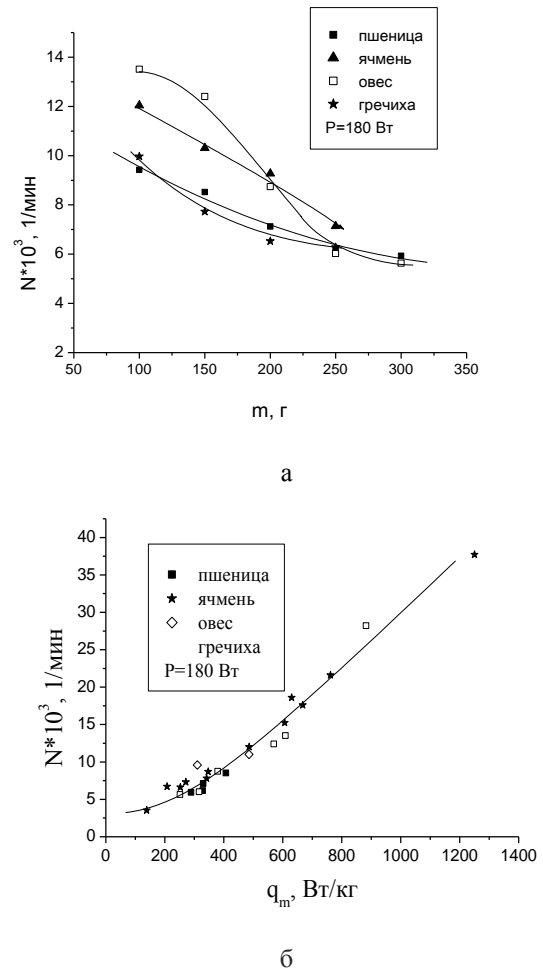


**Рисунок 1** – Изменение влагосодержания (а) и температуры (б) ячменя в зависимости от времени сушки в МВ камере при различной массе загрузки.

В зависимости от подводимой мощности, характер изменения температуры в этом периоде различался. При значениях приведенного теплового потока до  $q_m=450$  Вт/кг, т.е. отношения полезного теплового потока (количества теплоты, расходуемого на нагрев материала и испарение из него влаги) к массе образца  $q_m = \frac{Q_n}{m}$ , Вт/кг, температура практически не менялась. При увеличении приведенного теплового потока температура росла, и при значениях  $q_m > 600$  Вт/кг ее изменение было существенным. Период падающей скорости сушки определялся по

изменению хода кривой влагосодержания: кривая становилась пологой. Температура в этом периоде всегда возрастает. Описанная картина была типична для всех материалов. Влияние массы загрузки различных зерновых материалов и приведенного теплового потока на скорость их сушки отображается на рисунке 2.

Экспериментальные данные показали, что при массе загрузки меньше 200 г скорость сушки зависит от вида зерна (рис. 2а).



**Рисунок 2** – Зависимость скорости сушки зерна от массы загрузки (а) и полезного теплового потока (б) Выходная мощность магнетрона  $P=180$  Вт.

Вследствие различий в плотности и порозности слоев исследуемых зерновых, толщина этих слоев была различна. При массе 100 г толщина слоя овса составляла 35 мм, ячменя – 30 мм, пшеницы – 23 мм., гречихи – 22 мм. объемная плотность овса составляет  $530$  кг/м<sup>3</sup>, ячменя –  $620$  кг/м<sup>3</sup>, пшеницы –  $800$  кг/м<sup>3</sup>, гречихи –  $840$  кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, увеличение толщины слоя при фиксированной массе образцов приводит к соответствующему увеличению скорости сушки, что объясняется увеличением теплоизолирующих свойств. При увеличении массы выше 200 г различия в скоростях сушки существенно уменьшались.

Данные для всех исследованных материалов могут быть обобщены в виде зависимости скорости

сушки от приведенного теплового потока (рис. 2б).

$$N = 9.47 \cdot 10^{-6} (q_m)^{1.17}, \text{ мин}^{-1} \quad (1)$$

Для расчета полезного теплового потока удобно пользоваться формулой, которая учитывает потребляемую от сети электроэнергию  $P$ , КПД микроволновой камеры  $\eta_k$  и КПД магнетрона  $\eta_m$ .

$$Q_{пол} = P \cdot \eta_k \cdot \eta_m, \text{ Вт} \quad (2)$$

Для расчета средней температуры зерна  $\bar{t}_1$  в периоде постоянной скорости сушки (первом периоде) рекомендована зависимость, полученная по результатам экспериментальных исследований:

$$t_1 = 13.22 \cdot (q_m)^{0.28} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

Зависимости (1, 3) справедливы при  $200 \leq q_m \leq 1285$  Вт/кг с погрешностью  $\pm 15\%$  и  $\pm 13\%$ . Экспериментальные данные по интегральным влагосодержаниям и температурам для всех исследованных материалов обработаны в виде обобщенных кривых кинетики сушки и нагрева – зависимостей безразмерных текущих влагосодержания  $u/u_0$  и температуры  $t/t_1$  от безразмерного комплекса  $N\tau/u_0$  согласно рекомендациям [8]. В этом комплексе была использована скорость сушки в первом периоде. Комплексу  $N\tau/u_0$  может быть приписан определенный физический смысл [8]: это относительный (в долях от максимально возможного, определяемого начальным влагосодержанием материала) влагосъем за промежуток времени от 0 до  $\tau$ , который имел бы место, если бы средняя за этот период скорость сушки равнялась скорости в периоде постоянной скорости. Данные для всех исследуемых зерновых культур могут быть обобщены едиными уравнениями с приемлемой погрешностью. Соответствующие уравнения, описывающие все периоды процесса сушки исследованных культур при  $0,036 \leq \frac{N\tau}{u_0} \leq 0,83$ , имеют

вид:

$$\frac{\bar{u}}{u_0} = 1.016 - 0.332 \frac{N\tau}{u_0} - 1.449 \left( \frac{N\tau}{u_0} \right)^2 + 1.091 \left( \frac{N\tau}{u_0} \right)^3 \quad (4)$$

$$\frac{\bar{t}}{t_1} = 0.511 + 3.506 \left( \frac{N\tau}{u_0} \right) - 8.341 \left( \frac{N\tau}{u_0} \right)^2 + 7.095 \left( \frac{N\tau}{u_0} \right)^3 \quad (5)$$

Формулы (4, 5) справедливы со среднеквадратичной погрешностью  $\pm 9,8\%$  и  $\pm 11,9\%$  соответственно. Здесь  $\bar{u}$  – среднее влагосодержание слоя в текущий момент времени  $\tau$ ,  $u_0$  – начальное влагосодержание слоя,  $\bar{t}_1$  – средняя температура зерна в периоде постоянной скорости сушки (первом периоде).

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали результаты исследований, скорость МВ сушки при отсутствии перегрева зерна составляет  $(5-37) \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ , что существенно превышает значения, полученные при других способах подвода теплоты. Так, для зерна скорость кондуктивной сушки составляла  $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ мин}^{-1}$  [6], кондуктивно-конвективной – до  $1 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$  [7].

Нагрев слоя зернового материала в микроволновом поле существенно интенсифицирует процесс влагопереноса, что приводит к значительному увеличению скорости сушки в сравнении с другими способами подвода теплоты. Результаты исследования кинетики сушки свидетельствует о перспективности применения микроволновой сушки зерновых.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Зыков А. В., Саламаха В. И., Безбах И. В., Айда Амор.** Развитие техники послеуборочной термообработки зерна // Пути повышения эффективности хранения и переработки сельскохозяйственной продукции: Сборник научных статей. – ОЦНТЭИ. О.: 1999. – С.51-55.
2. **Станкевич Г. Н.** Технологии и техники сушки зерна в Украине // Промышленная теплотехника. – 2002. – Т. 24. – С. 52-56.
3. **Mujumdar A. S., Kudra T.** Progress in drying technologies. – 2001. – Vol. 7. – 459 p.
4. **Advances in Agricultural Science and Technology. Volume 1. Advances in Bioprocessing Engineering // Editors H. Yang, J. Tang. London, World Scientific. – 2002. – 172 p.**
5. **Календерьян В.А., Бошкова И.Л.** Тепломассообмен в аппаратах с плотным дисперсным слоем // Монография. – К.: 2011. – 184 с.
6. **Календерьян В.А., Корнараки В.В., Кислицина А.Л.** Тепловлагоперенос при сушке дисперсных материалов в плотном слое // Тепломассообмен ММФ-96, "Тепломассообмен в процессах сушки". – 1996. – Т. 8. – С. 110-114.
7. **Календерьян В.А., Волгушева Н.В.** Математическая модель процесса сушки дисперсных материалов в движущемся плотном слое при комбинированном подводе теплоты // Придніпровський наук. вісн. – 1998. – №108 (175). – С. 11-16.
8. **Календерьян В. А., Корнараки В. В.** Теплообмен и сушка в движущемся плотном слое. – К.; О.: Вища шк., – 1982. – 158 с.

Отримана в редакції 17.09.2015, прийнята до друку 18.12.2015

*N. V. Volgusheva*

Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatnaya str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: n-volgusheva@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>

## THE KINETICS OF DRYING OF GRAIN MATERIALS IN A MICROWAVE FIELD

*The paper presents the results of a study of the kinetics of drying of a dense layer of grain materials in a microwave field. It is shown that the changes of moisture content and temperature time curves correspond to the characteristic of drying colloidal capillary-porous bodies in other methods of supplying heat. Data on the rate of drying for all investigated materials are summarized by a single dependence. Presented in a set of empirical formulas enables the calculation of moisture content and temperature depending on the target output power of the magnetron, the mass of the load and time. It is determined that the speed of drying in the microwave field significantly exceeds the values obtained with other methods of heat supply.*

**Key words:** Microwave drying – Moisture content – Temperature – Useful heat flow – Speed of drying

### REFERENCES

1. **Zyikov A. V., Salamaha V. I., Bezbah I. V., Ayda Amor.** 1999. Razvitie tehniki posleuborochnoy termoobrabotki zerna. Puti povysheniya effektivnosti hraneniya i pererabotki selskohozyaystvennoy produktsii: Sbornik nauchnykh statey, OTsNTEI, 51-55. (in Russian)
2. **Stankevich G. N.** 2002. Tehnologii i tehniki sushki zerna v Ukraine. Promyishlennaya teplotekhnika, Vol. 24, 52-56. (in Russian)
3. **Mujumdar A. S., Kudra T.** 2001. Progress in drying technologies, Vol. 7, 459 p.
4. **Advances in Agricultural Science and Technology.** 2002. Volume 1. Advances in Bioprocessing Engineering. Editors H. Yang, J. Tang. London, World Scientific, 172 p.
5. **Kalenderyan V. A., Boshkova I. L.** 2011. Teplomassoperenos v apparatah s plotnyim dispersnyim sloem. Monografiya. 184 p. (in Russian)
6. **Kalenderyan V. A., Kornaraki V. V., Kislitsina A.L.** 1996. Teplovlagoperenos pri sushke dispersnykh materialov v plotnom sloe. Teplomassoobmen MMF-96, "Teplomassoobmen v protsessah sushki". Vol. 8. P. 110-114. (in Russian)
7. **Kalenderyan V. A., Volgusheva N. V.** 1998. Matematicheskaya model protsessa sushki dispersnykh materialov v dvizhushchemsya plotnom sloe pri kombinirovannom podvode teploty. PridnIprovskiy nauk. vIsn, No. 108 (175) P. 11-16. (in Russian)
8. **Kalenderyan V. A., Kornaraki V. V.** 1982. Teploobmen i sushka v dvizhushchemsya plotnom sloe. Vischa shk. 158 p. (in Russian)

---

Received 17 September 2015  
Approved 18 December 2015  
Available in Internet 28.02.2016