



Исследования комбинированных режимов СВЧ-сушки зерна

Сергей Анатольевич Павлов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: vim@vim.ru;

Игорь Анатольевич Пехальский,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник;
Николай Георгиевич Кынев,
старший научный сотрудник

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Для обеспечения высокого качества высушиваемых материалов одним из перспективных способов обезвоживания растительного сырья является способ сушки под действием электромагнитного излучения сверхвысокой частоты (СВЧ-сушка). СВЧ-сушку широко используют в различных областях промышленности, в частности, в пищевой и деревообрабатывающей. (*Цель исследования*) Рассчитать длительность СВЧ-импульса, паузы; экспериментально определить их, а также величину влагосъема при импульсе и глубину проникновения его в слой. (*Материалы и методы*) При сушке в СВЧ-поле градиент влагосодержания в материале препятствует движению влаги к поверхности, возможно также образование внутренних трещин. Поэтому лучшие результаты дают комбинированные методы сушки. Рассчитали длительность импульса по допустимому приращению температуры зерна, длительность паузы определили из предположения, что при импульсе влага из ядра зерновки выталкивается наружу, и ее охлаждение происходит в изотермических условиях потоком воздуха. (*Результаты и обсуждение*) Подтвердили, что при длительности импульса СВЧ-энергии 4, 6 и 10 с, скорость обдува и продувки слоя наружным воздухом составляла 0,5 м в секунду. При охлаждении зерна естественной конвекцией время импульса – 10 с, время паузы – 1, 2, 3 и 5 мин. Для режима с обдувом время воздействия импульсом составило 6 и 10 с, обдува – 0,5; 1,0 и 1,5 мин. Максимальную длительность СВЧ-импульса определили плотностью потока допустимой теплоты нагрева зерна и долей теплоты, пошедшей на испарение влаги при нагреве до 20-25 градусов. (*Выводы*) Длительность паузы определяется временем охлаждения зерна до температуры, предшествующей импульсу. Экспериментально подтвердили расчетные значения длительности импульса и паузы с погрешностью 15 процентов на зерне влажностью 20-24 процента при плотности СВЧ-потока 0,7 кВт на квадратный метр; глубина проникновения в зерновку 70 процентов СВЧ-энергии выше 20-22 мм, а влагосъем – 0,1-0,15 процента.

Ключевые слова: СВЧ-сушка, зерно, зернобобовые, режимы, длительности импульса и паузы.

■ Для цитирования: Павлов С.А., Пехальский И.А., Кынев Н.Г. Исследования комбинированных режимов СВЧ-сушки зерна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №6. С. 25-30. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-6-25-30

Studies of the Combined Modes of Microwave Grain Drying

Sergey A. Pavlov,
Ph.D.(Eng.), key research engineer,
e-mail: vim@vim.ru;

Igor A. Pekhalsky,
Ph.D.(Eng.), key research engineer;
Nikolay G. Kynev,
senior research engineer

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. To ensure the high quality of the materials being dried, one of the most promising ways to dehydrate vegetable raw materials is drying under the action of electromagnetic radiation (microwave drying). Microwave drying is widely used in various industries, in particular, in the food and woodworking industries. (*Research purpose*) Calculation of the microwave pulse and pause duration; their experimental determination, as well as the determination of the moisture removal rate at the pulse moment and the depth of pulse penetration into the layer. (*Materials and methods*) When drying in a microwave field, the gradient of moisture content in the material prevents the moisture movement towards the surface, internal cracks can be formed as well. Therefore, the combined methods of drying can yield the best results. The pulse duration has been



calculated by the permissible increment of the grain temperature, the pause duration has been determined by assuming that during the pulse, moisture from the caryopsis kernel is pushed out and cooled under isothermal conditions by an air flow. (*Results and discussion*) It has been confirmed that at a microwave pulse energy duration of 4, 6, and 10 s, the speed of blow-off and blowdown of the layer with external air was 0.5 m per second. When grain is cooled by natural convection, the pulse time is 10 s, the pause time is 1, 2, 3, and 5 min. For the blow-off mode, the pulse exposure time was 6 and 10 s, that of blow-off - 0.5, 1.0, and 1.5 minutes. The maximum duration of the microwave pulse was determined by the flow density of allowable grain heating and the fraction of heat required for the evaporation of moisture when heated to 20-25 degrees. (*Conclusions*) The pause duration is determined by the grain cooling time to the temperature preceding the pulse. It has been experimentally established that the calculated values of the pulse and pause duration with an accuracy of 15 percent for grain with a moisture content of 20-24 percent at a microwave flow density of 0.7 kilowatts per square meter, at a depth of the microwave energy penetration into the grain by 70 percent, do not exceed 20-22 mm, and the moisture removal rate is 0.1-0.15 percent.

Keywords: microwave drying, grain, leguminous crops, modes, pulse and pause duration.

■ **For citation:** Pavlov S.A., Pekhal'skiy I.A., Kynev N.G. Issledovaniya kombinirovannykh rezhimov SVCh-sushki zerna [Studies of the combined modes of microwave grain drying]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N6. 25-30. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-6-25-30 (In Russian).

Для обеспечения высокого качества высушиваемых материалов одним из перспективных способов обезвоживания растительного сырья служит способ сушки на основе воздействия электромагнитного излучения сверхвысокой частоты (СВЧ). СВЧ-сушка достаточно широко используется в различных областях промышленности, в частности, в пищевой и деревообрабатывающей. Однако для сушки растительного сырья этот метод не получил широкого распространения [1-4].

Работа известных СВЧ-сушилок носит характер периодического действия. Сушилки непрерывного действия характеризуются локальным перегревом сырья, созданием объемно-напряженного деформированного состояния с растрескиванием материала и невысокой энергетической эффективностью процесса. Это обусловлено недостаточной взаимосвязанностью технологических режимов с кинетическими закономерностями сушки конкретных материалов [5, 6]. Продолжительность электромагнитного СВЧ-воздействия на высушиваемый материал и паузы, во время которой его охлаждают, отличается в несколько раз. Удельные затраты тепла на единицу готового продукта – в 2-3 раза и более [7]. Эти технологические параметры определяют не только качество продукта, но и производительность установки, а также энергозатраты на сушку.

Отличительная особенность воздействия СВЧ-энергии на высушиваемый продукт – равномерность внутреннего нагрева и выделение теплоты во всем объеме влажного продукта, что способствует однородности прогрева сырья, снижению напряженно-деформированного состояния материала и, как следствие, улучшению органолептических показателей качества готового продукта.

Анализ процессов СВЧ-сушки показал, что хо-

тя при данной сушке используют импульсные режимы, в том числе с обдувкой и продувкой слоя наружным воздухом, но неизвестно время действия СВЧ-импульса и паузы, при которой происходит охлаждение зерна, [8].

Цель исследования – рассчитать длительность СВЧ-импульса и паузы; экспериментально определить эти параметры, а также величины влагосъема и глубины проникновения импульса в слой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Кинетика сушки токами высокой и сверхвысокой частоты существенно не отличается от кинетики конвективной сушки. В начале процесса материал быстро нагревается, скорость сушки возрастает, затем наступает период постоянной скорости, характеризуемый постоянством температуры и падающей скоростью испарения. Соотношение периодов постоянной и убывающей скоростей сушки определяется только формами и видами связи влаги с исследованными материалами. Известно, что чрезмерное увеличение подводимой СВЧ-мощности способствует возникновению большого градиента влагосодержания, и как следствие, образованию трещин и нарушению структуры готового продукта.

В зависимости от электрофизических, теплофизических и режимных параметров процесса температура материала может меняться в широких пределах [5]. При сушке в СВЧ-поле градиент влагосодержания в материале препятствует движению влаги к поверхности, кроме того, велика вероятность образования внутренних трещин. Поэтому с точки зрения технологии лучшие результаты дают комбинированные методы сушки [3, 8]. Рассмотрим комбинированную сушку, при которой нагрев зерна осуществляется СВЧ-энергией, а пары влаги удаляются путем продувки наружным воздухом.



Поток тепла к зерну при импульсе можно записать:

$$Q = \frac{\Delta U r G \eta}{\Delta \tau}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где Q – плотность СВЧ-потока, кВт/м²;
 ΔU – влагосъем, кг вл/кг сух. мат;
 r – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг;
 G – масса материала, кг;
 η – доля теплоты, пошедшая на испарение влаги;
 $\Delta \tau$ – время, ч.

Допустимое теплоснабжение семян, при котором не превышена предельно допустимая температура, составляет [9]:

$$Q_{\text{п}} = 98,5 \text{ кДж/кг.}$$

Его величина определяется уравнением:

$$Q_{\text{п}} = c \Delta T, \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

где c – теплоемкость зерна, кДж/кг °С;
 ΔT – предельно допустимое приращение температуры при нагреве, °С.

Принимая во внимание, что при сушке зерна $\Delta U_{\text{г}} = Q_{\text{п}}$, запишем выражение (1) в виде:

$$Q = \frac{c \Delta T f_o \eta}{f \Delta \tau}, \text{ Вт/м}^2, \quad (3)$$

где f, f_o – удельная поверхность зерна и поверхность воздействия СВЧ-потока на зерно, м²/кг.

Для облучения элементарного слоя зерна высотой h_i , когда поверхность облучения равна теплообменной поверхности, продолжительность воздействия СВЧ-потока, при котором не будет превышен предельно допустимый нагрев, можно записать в виде:

$$\Delta t_i = \frac{c \Delta T \eta}{Q_o}, \text{ } ^\circ\text{С}, \quad (4)$$

где Δt_i – перепад температуры в экспериментальном слое;

$$Q_o - \text{удельная мощность СВЧ-потока, Вт/м}^2.$$

Для слоя высотой H запишем:

$$\Delta t = \frac{c \Delta T \eta H}{Q_o h_i}, \text{ } ^\circ\text{С}, \quad (5)$$

где Δt – перепад температуры;

h_i – высота элементарного слоя, м.

Под действием импульса зерно нагревается до определенной температуры с незначительным испарением влаги, которая насыщает оболочку и выступает на поверхности зерновки, что способствует быстрому охлаждению ее при последующей продувке наружным или подогретым воздухом.

Подбирая длительность импульса и паузы, можно осуществить безопасную комбинированную

СВЧ-сушку зерна при неизменной температуре зерна.

Длительность паузы можно рассчитать из уравнения массоотдачи нагретого зерна при вентилировании для условия $\varphi \approx const$ [10]:

$$\tau_{\text{п}} = \frac{R}{\beta} \ln \frac{\varphi_{\text{ср}} - \varphi_1}{\varphi_{\text{ср}} - \varphi_2}, \quad (6)$$

где R – радиус зерновки, м;
 β – коэффициент массоотдачи, м/с;
 $\varphi_{\text{ср}}, \varphi_1, \varphi_2$ – средняя относительная влажность паров влаги на поверхности зерновки после воздействия СВЧ-импульса, относительная влажность наружного (подогретого) и отходящего воздуха.

Величину β можно определить из [11]; а значение влажности – по формуле:

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\varphi_o - \varphi_2}{2}, (\varphi_o = 1,0).$$

Для определения $\Delta t, \tau_{\text{п}}$ параметров кинетики комбинированной СВЧ-сушки проведем эксперимент.

Для сушки использовали увлажненные до 21-24% семена пшеницы и семена сои. Исследования проводили в СВЧ-установке со следующими техническими характеристиками: потребляемая мощность – 1500 Вт; выходная мощность – 1100 Вт; плотность потока – 0,7 кВт/м², частота – 915 МГц.

Под вращающуюся тарелку в СВЧ-установке подведен источник СВЧ. На тарелку поместили стеклянный бокс с семенным слоем $1,5 \pm 0,2$ см (рис. 1).

Длительность импульса СВЧ-энергии состав-

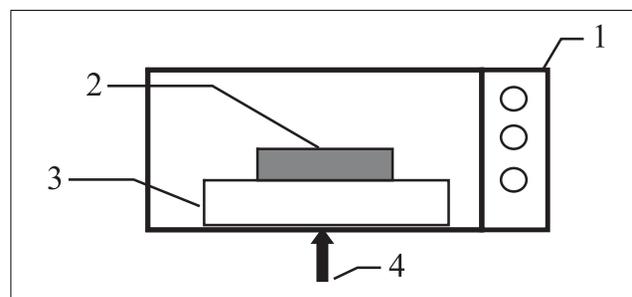


Рис. 1. Технологическая схема экспериментальной установки: 1 – корпус СВЧ; 2 – бокс; 3 – вращающаяся тарелка; 4 – СВЧ-поток

Fig. 1. Technological scheme of the experimental setup: 1 – body microwave; 2 – box; 3 – rotating plate; 4 – microwave stream

ляла 4, 6 и 10 с, скорость обдува и продувки слоя наружным воздухом – 0,5 м/с. При охлаждении зерна естественной конвекцией время импульса – 10 с, время паузы – 1, 2, 3 и 5 мин. Время обдува – 0,5; 1,0 и 1,5 мин. Для режима с продувкой слоя время воздействия импульса составило 4, 6 и 10 с, продувки – 20 и 40 с. Влажность семян определяли взвешиванием на лабораторных весах с погрешностью



± 0,01 г, температуру – инфракрасным термометром с погрешностью ± 0,1°C. Температура наружного воздуха в опытах составляла 20°C, относительная влажность – 60%.

После облучения определяли влажность зерна. Далее зерно охлаждали, либо выдерживая его на открытом воздухе, либо с помощью обдува. Периодически измеряли влажность и температуру зерна. В конце опыта определяли его конечную температуру и влажность. Затем отбирали пробы для определения всхожести зерна.

Обдували навеску в кассете горизонтальным потоком воздуха, продували сверху вниз в бюксе с решетчатым днищем. Исследовали режим комбинированной сушки с подогревом наружного воздуха до 42°C для сокращения длительности импульса. Исходные данные и результаты экспериментальных исследований приведены в таблице и на рисунках 2-4.

При СВЧ-сушке важное значение имеет правильный выбор толщины слоя. Чем больше толщина слоя, тем меньше глубина проникновения СВЧ-энергии и выше неравномерность сушки, что снижает качество продукта. Проведены эксперименты для определения оптимальной толщины слоя.

Радиопрозрачные бюксы, установленные один на другой, с высотой слоя зерна в каждом из них 10 мм, подвергали воздействию СВЧ-энергии в течение 10 с, а затем определяли влагосъем зерна в этих бюксах (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. На основе тепловых балансов рассчитаны продолжительность СВЧ-импульса и паузы при охлаждении зерна наружным воздухом.

Установлено, что длительность импульса зависит от удельной мощности СВЧ-потока, допустимого тепла, которое могут воспринять семена (зерно) при нагреве, доли тепла, пошедшего на испарение влаги, и от высоты слоя. Для расчета длительности паузы, во время которой зерно охлаждается продувкой, можно использовать уравнение массоотдачи при $\varphi const$.

Оптимальный комбинированный режим СВЧ-сушки зерна – периодическое повышение его температуры на 15-20°C и снижение на эту же величину при продувке наружным воздухом, причем максимальная температура зерна не должна превысить предельно допустимую. Это обеспечивает сохранность качественных показателей зерна.

Доля тепла, пошедшего на испарение влаги при

Таблица		Исходные данные и результаты комбинированных режимов СВЧ-сушки								Table	
		INITIAL DATA AND THE RESULTS OF COMBINED MODES OF MICROWAVE DRYING									
Материал / Material	Режим вентилирования Ventilation mode	Исходная влажность зерна, % Initial grain moisture, %	Толщина слоя, м Layer thickness, m	Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·°C Heat transfer coefficient, W/m ² ·°C	Длительность воздействия Exposure duration		Конечная влажность, % Final humidity, %	Длительность сушки, мин Drying time, min	Конечная температура зерна, °C Final temperature of grain, °C		
					СВЧ-импульс, с Microwave pulse, s	пауза мин, с pause min, s					
Пшеница / Wheat	Естественная конвекция Natural convection	21	0,005-0,01	3	6	0,5	16,3	40	62		
					6	3,0	15,8			52	
					6	5,0	15,7			40	
Пшеница / Wheat	Обдув наружным воздухом Airflow by outside air	21	0,005-0,01	7	6	0,5	16,2	15	56		
							1,0			15,5	50
							1,5			14,9	48
Пшеница / Wheat	Продувка слоя: наружным воздухом подогретым воздухом* Blowdown of the layer by: outside air heated air	24	0,005-0,01	20	6	20,0	17,0	7	53		
		24	0,005-0,01	20	6	20,0	15,0	7	65		
Соя Soybeans	Продувка наружным воздухом Blowing outside air, soybeans	20	0,05-0,01	20	6	20,0	17,3	30	40		

* температура подогретого воздуха – 42°C

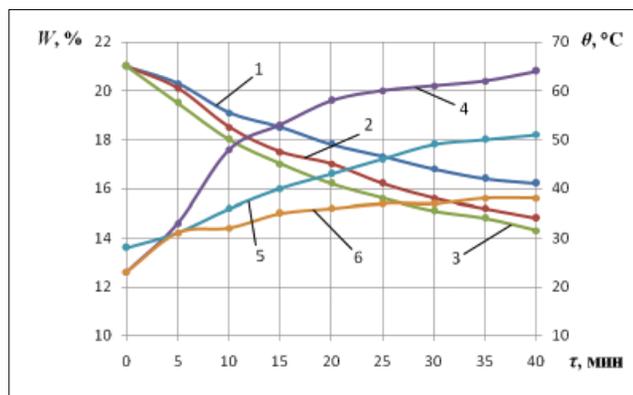


Рис. 2. Зависимость влажности W (1, 2, 3) и температуры θ (4, 5, 6) от времени τ сушки: время воздействия СВЧ-импульса – 10 с; пауза 0,5 мин (1, 4); 3 мин (2, 5); 5 мин (3, 6)

Fig. 2. Humidity dependence W (1, 2, 3) and temperatures θ (4, 5, 6) on the drying time τ : the exposure time of the microwave pulse is 10 s; pause 0.5 min (1, 4); 3 min (2, 5); 5 min (3, 6)

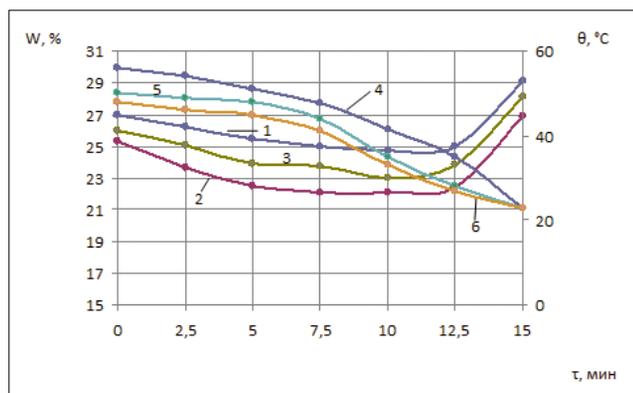


Рис. 3. Зависимость влажности W (1, 2, 3) и температуры θ (4, 5, 6) от времени τ сушки: время воздействия СВЧ-импульса – 10 с; обдув наружным воздухом – 0,5 мин (1, 4); – 1 мин (2, 5); – 1,5 мин (3, 6)

Fig. 3. Dependence of humidity W (1, 2, 3) and temperature θ (4, 5, 6) on drying time τ : exposure time of microwave pulse – 10 s; outdoor air blowing – 0.5 min (1, 4); – 1 min (2, 5); – 1.5 min (3, 6)

СВЧ-нагреве, незначительна и не превышает 0,1-0,15, в то время как при конвективной сушке она составляет – 0,6-0,8, что обуславливает необходимость использования комбинированных режимов с промежуточным охлаждением. Глубина проникновения 70% СВЧ-энергии в слой зерна влажностью 20-24% не превышает 20-22 мм (рис. 5).

Процесс СВЧ-сушки можно интенсифицировать, если при продувке использовать подогретый воздух вместо наружного, одновременно снизив длительность СВЧ-импульса. Установлено, что продувка слоя зерна воздухом, нагретым до 42°C, первоначально ведет к снижению, а затем к резкому повышению его температуры. Более эффективен режим охлаждения зерна продувкой слоя наружным воздухом. При этом процессе сушки снижает-

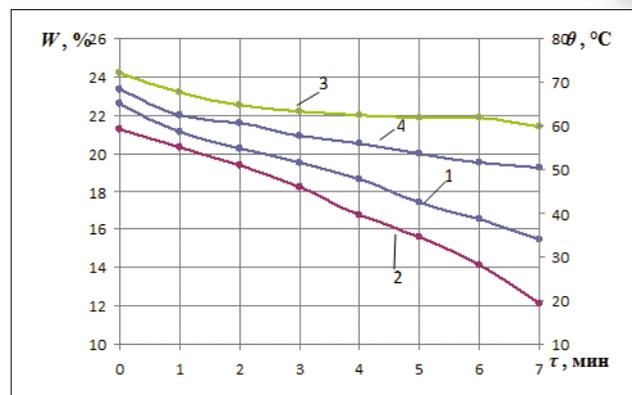


Рис. 4. Зависимость влажности W (1, 3) и температуры θ (2, 4) зерна от времени τ сушки: время воздействия СВЧ – 6 с; продувка подогретым (1, 2) и наружным (3, 4) воздухом в течение 20 с

Fig. 4. The dependence of the moisture content W (1, 3) and temperature θ (2, 4) grain on time τ drying: exposure time microwave – 6 s; blowing heated (1, 2) and external (3, 4) air for 20 s

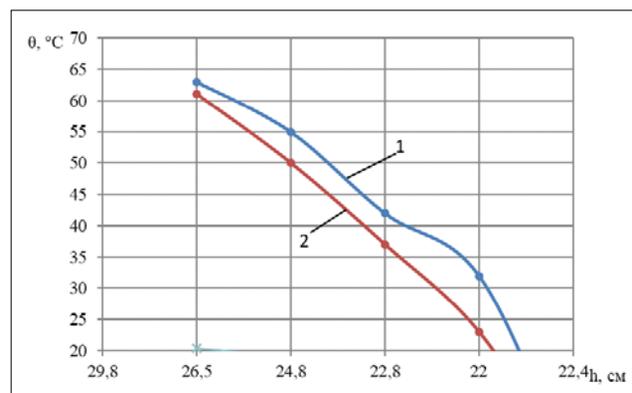


Рис. 5. Зависимость температуры θ (1, 2) зерна пшеницы от высоты слоя h при СВЧ-воздействии: 1 – $W = 24\%$; 2 – $W = 21\%$; длительность импульса $\tau = 10$ с.

Fig. 5. Temperature dependence θ (1, 2) wheat grain on the height of the layer h at microwave exposure: 1 – $W = 24\%$; 2 – $W = 21\%$; pulse duration $\tau = 10$ s

ся температура, а продувка слоя зерна подогретым воздухом ведет к снижению всхожести семян. Кинетика комбинированной сушки принципиально не отличается от кинетики сушки пшеницы, но длительность процесса возрастает в квадратичной зависимости от радиуса зерновки, что показано на примере СВЧ-сушки сои.

Выводы

Максимальная длительность СВЧ-импульса определяется плотностью потока допустимой температуры нагрева зерна и долей теплоты, пошедшей на испарение влаги при нагреве на 20-25°C. Длительность паузы определяется временем охлаждения зерна до температуры, предшествующей импульсу.

Расчетные значения длительности импульса и паузы с погрешностью $\pm 15\%$ подтверждены экспе-

риментом на зерне влажностью 20-24% при плотности СВЧ-потока 0,7 кВт/м². Глубина проникно-

вения 70% СВЧ-энергии не превышает 20-22 мм, а влагосъем при импульсе составляет 0,1-0,15%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пахомов В.И., Каун В.Д. Оптимизация тепловой обработки фуражного сырья СВЧ энергией // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2000. №9. С. 8-10.
2. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Электромагнитные технологии обезвоживания сырья // *Problemele energeticii regionale*. 2012. №1 (18). С. 69-79.
3. Jomeh Z.E., Askari G.R. Microwave Drying, as Against Combined Method of Drying Sliced Apple. *Iran journal of agricultural sciences*. 2004. Vol. 35. №3. 777-785.
4. Hoover M.W., Markantonatos A., Parker W.N. Experimental and engineering aspects of accelerated freeze-drying of foods by means of UHF dielectric heating // *Food Technology*. 1966. Vol. 20. 103-110.
5. Вендин С.В. Интегральная оценка температурного действия СВЧ обработки семян // *Техника в сельском хозяйстве*. 1995. №3. С. 31-32.
6. Клоков Ю.В. Теория удаления влаги. О нагреве пищевых продуктов в ЭМП СВЧ «объемно» // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2003. №7. С. 29-31.
7. Puescner H. Heating with microwaves. Holland. 1966. 317.
8. Голубкович А.В., Павлов С.А. Оптимизация сушки зерна при осциллирующем режиме // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. Т. 8. №1. С. 10-14.
9. Птицин С.Д. Зерносушилки. М.: Машгиз. 1962. 50 с.
10. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия 1968. С. 83-97.
11. Елизаров В.П., Артюшин А.А., Ценч Ю.С. Перспективные направления развития отечественной сельскохозяйственной техники // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. №2(31). С. 12-18.

REFERENCES

1. Pakhomov V.I., Kaun V.D. Optimizatsiya teplovoy obrabotki furazhnogo syr'ya SVCh energiyei [Optimization of heat treatment of raw fodder materials with microwave energy]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2000. №9. 8-10 (In Russian).
2. Burdo O.G., Terziyev S.G., Yarovoy I.I., Borshch A.A. Elektromagnitnyye tekhnologii obezvozhivaniya syr'ya [Electromagnetic technologies of raw materials dehydration]. *Problemele energeticii regionale*. 2012. №1(18). 69-79 (In Russian).
3. Jomeh Z.E., Askari G.R. Microwave Drying, as Against Combined Method of Drying Sliced Apple. *Iran journal of agricultural sciences*. 2004. Vol. 35. №3. 777-785 (In English).
4. Hoover M.W., Markantonatos A., Parker W.N. Experimental and engineering aspects of accelerated freeze-drying of foods by means of UHF dielectric heating. *Food Technology*. 1966. Vol. 20. 103-110 (In English).
5. Vendin S.V. Integral'naya otsenka temperaturnogo deystviya SVCh obrabotki semyan [Integral assessment of the temperature action of microwave seed treatment]. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*. 1995. №3. 31-32 (In Russian).
6. Klokov Yu.V. Teoriya udaleniya vlagi. O nagreve pishchevykh produktov v EMP SVCh "ob'yemno" [Theory of moisture removal. On "volumetric" foodstuff heating in the microwave EMF]. *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya*. 2003. №7. 29-31 (In Russian).
7. Puescner H. Heating with microwaves. Holland. 1966. 317 (In English).
8. Golubkovich A.V., Pavlov S.A. Optimizatsiya sushki zerna pri ostilliruyushchem rezhime [Optimization of grain drying in the oscillating mode]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2014. №1. 10-14 (In Russian).
9. Ptitsyn S.D. Zernosushilki [Grain driers]. Moscow: Mashgiz. 1962. 50 (In Russian).
10. Lykov A.V. Teoriya sushki [Theory of drying]. Moscow: Energiya. 1968. 83-97 (In Russian).
11. Elizarov V.P., Artyushin A.A., Tsench Yu.S. Perspektivnye napravleniya razvitiya otechestvennoy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Promising development trends of domestic agricultural machinery]. *Vestnik VIESH*. 2018. №2(31). 12-18 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.05.2018
The paper was submitted
to the Editorial Office on 14.05.2018

Статья принята к публикации 20.07.2018
The paper was accepted
for publication on 20.07.2018