

## Инфракрасная сушка семян в псевдооживленном слое

**Яков Петрович Лобачевский,**

доктор технических наук, член-корреспондент  
Российской академии наук,  
главный научный сотрудник;

**Сергей Анатольевич Павлов,**

кандидат технических наук, ведущий научный со-  
трудник,  
e-mail: sapavlov777@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Инфракрасная сушка нашла широкое применение преимущественно в пищевой промышленности. Семена зерновых культур сушат в основном конвективным методом в шахтных, колонковых и бункерных сушилках. Подобные методы сушки малоэффективны, их отличает низкая производительность и высокие удельные затраты тепла. Исследовали методы сушки, обеспечивающие высокую интенсивность процесса при максимальном сохранении качества семян. Один из них – комбинированная инфракрасная сушка. Сушка имеет ряд преимуществ перед конвективной сушкой – быстрый прогрев частиц обеспечивает сокращение длительности процесса, а суммирование процессов диффузии и термодиффузии способствует перемещению влаги из центра зерновки к периферии, что снижает удельные затраты тепла на сушку. Рассмотрели комбинированный метод с использованием псевдооживленного слоя при малой интенсивности инфракрасного потока, с дополнительным подводом тепла подогретым наружным воздухом. (*Цель исследования*) Разработать математическую модель конвективно-радиационной инфракрасной сушки семян, рассчитать температуру поверхности, мощность инфракрасного излучателя, параметры подогрева воздуха. (*Материалы и методы*) Обосновали параметры комбинированной инфракрасной сушки используя закономерности, характерные для конвективной сушки, но с эквивалентным коэффициентом теплоотдачи. Определили температуру и мощность источника инфракрасной энергии на основе допустимого теплоснабжения. Экспериментально оценили эффективность инфракрасной сушки при продувке наружным и подогретым воздухом с конвективной сушкой. (*Результаты и обсуждение*) Температура поверхности и мощности инфракрасного излучателя зависят от толщины слоя, физико-механических и радиологических свойств семян, допустимого теплосодержания и теплоты, затраченной на испарение влаги. Установили, что экспозиция комбинированной сушки на 12 процентов ниже конвективной за счет интенсификации процесса при полном сохранении качественных показателей семян. (*Выводы*) Рассчитали температуру поверхности и мощность инфракрасного излучателя в зависимости от высоты слоя, физико-механических и радиологических свойств семян, допустимого теплосодержания и теплоты, затраченной на испарение влаги. Величина степени нагрева воздуха при комбинированной инфракрасной сушке пропорциональна дефициту мощности инфракрасного излучателя и обратно пропорциональна эквивалентному коэффициенту теплоотдачи.

**Ключевые слова:** инфракрасная сушка, температура, мощность инфракрасного источника, псевдооживление, эксперимент.

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Павлов С.А. Инфракрасная сушка семян в псевдооживленном слое // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12. №4. С. 39-43. DOI 10.22314/2618-6748-2018-12-5-39-43.

## Infrared Drying of Seeds in a Fluidized Bed

**Yakov P. Lobachevsky,**

Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian  
Academy of Sciences, chief research associate;

**Sergey A. Pavlov,**

Ph.D.(Eng), key research engineer, e-mail: sapavlov777@  
mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Infrared drying (IR) has found wide application mainly in the food industry. Seeds of cereal crops are dried mainly by a convection method using shaft, column and bunker dryers. Such drying methods are ineffective, they are characterized by low productivity and high specific heat costs. The author has studied some methods of drying ensuring high intensity of the process with the maximum preservation of the quality of seeds. One of them is combined infrared drying. Combined modes of IR drying have a number of advantages over convection drying - quick heating of the particles ensures shortened process time, and the combination of diffusion and thermal diffusion processes facilitates the transfer of moisture from the grain mass center to the periphery, which reduces the specific heat consumption of a drying process. The author has considered a combined method with

the use of a fluidized bed with a low intensity of the IR flow, with an additional supply of heat by the heated external air. (*Research purpose*) To develop a mathematical model of convective radiation IR drying of seeds, to calculate the surface temperature, the power of an IR-emitter, and the parameters of air heating. (*Materials and methods*) The parameters of combined IR drying have been determined using the regularities characteristic for convective drying, but with an equivalent heat transfer coefficient. The temperature and power of the IR energy source have been determined on the basis of permissible heat supply. The author has experimentally evaluated the efficiency of IR drying with blowing by external and heated air with convection drying. (*Results and discussion*) The surface temperature and the power of an IR emitter depend on the thickness of the layer, physical-and-mechanical and radiological properties of seeds, permissible heat content and heat spent on the evaporation of moisture. It has been established that the exposure of combined drying is 12 percent lower than that of convective drying due to the process intensification with full preservation of the quality parameters of seeds. (*Conclusions*) The surface temperature and power of an IR emitter have been calculated as a function of the layer height, physical-and-mechanical and radiological properties of seeds, permissible heat content and heat spent on the evaporation of moisture. The degree of air heating with combined IR drying is proportional to the power deficit of an IR emitter and is inversely proportional to the equivalent heat transfer coefficient.

**Keywords:** IR-drying, temperature, power of an IR source, fluidization, experiment.

**For citation:** Lobachevsky Ya.P., Pavlov S.A. Infrared drying of seeds in a fluidized bed. *Selskokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(4). 39-43. DOI 10.22314/2618-6748-2018-12-5-39-43. (In Russian).

**И**нфракрасная (ИК) сушка нашла широкое применение преимущественно в пищевой промышленности [1, 2]. Семена зерновых культур сушат в основном конвективным методом в шахтных, колонковых, бункерных, а также рециркуляционных сушилках [3]. Эти способы сушки малоэффективны, характеризуются низкой производительностью и высокими удельными затратами тепла. Исследования последних лет направлены на совершенствование методов сушки, обеспечивающих наиболее высокую производительность процесса при максимальном сохранении качественных показателей семян. Один из таких методов – комбинированная ИК-сушка [4-7].

Для описания процессов, протекающих в псевдооживленном слое при ИК-сушке, уравнения переноса лучистой энергии следует решать совместно с уравнениями движения и конвективного теплообмена. Для практических расчетов обычно используют принцип независимости конвективного и лучистого потоков друг от друга, что оказывается практически достоверным, если один из них значительно меньше другого. Например, для учета теплоотдачи через излучение рекомендуют суммировать коэффициент теплоотдачи конвекцией, подсчитанный обычным способом, и коэффициент теплоотдачи излучением.

Комбинированные режимы ИК-сушки имеют ряд преимуществ перед конвективной сушкой: быстрый прогрев частиц обеспечивает сокращение длительности процесса, а суммарное воздействие диффузии и термодиффузии способствует перемещению влаги из центра зерновки к периферии и снижает удельные затраты тепла на сушку.

Однако длительное воздействие ИК-излучателем приводит к быстрому повышению температуры, что снижает качественные показатели семян, в первую очередь их всхожесть. Следовательно, не-

обходимо прерывать процесс облучения семян ИК-лучами для воздушного охлаждения. При облучении зерновка нагревается с незначительным испарением влаги, во время обдува охлаждение в результате испарения влаги аккумулярованным теплом сопровождается более существенным влагоусоемом [8, 9].

При комбинированном методе сушки семян период охлаждения является необходимым. Температурный градиент ускоряет подвод влаги к поверхности семян, что может привести к их растрескиванию. Сушку следует проводить при малом градиенте влагосодержания, исключающем появление трещин. Однако прерывание ИК-облучения в аппарате непрерывного действия не всегда экономически целесообразно.

Рассмотрим комбинированный метод сушки при малой интенсивности ИК-потока, но с дополнительным подводом тепла подогретым воздухом при непрерывном облучении.

**Цель исследования** – разработать математическую модель конвективно-радиационной сушки семян, рассчитать температуру поверхности и мощность ИК-излучателя, параметры подогрева воздуха и выполнить их экспериментальную проверку.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Определим температуру источника ИК-сушки, ниже которой допустима постоянная подача ИК-энергии. При превышении этой температуры необходимо использовать только импульсную подачу. Тепловой поток при ИК-сушке можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma \left[ \left( \frac{T_{\text{ис}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_{\text{к}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты;  $\sigma = 5,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $T_{\text{ис}}$ ,  $\theta_{\text{к}}$  – температура излучения и конечная температура семян, К.



Допустимое теплосодержание семян в тонком слое, при котором не будет превышена предельно допустимая температура равна:

$$Q_{п} = 97,3 \text{ Вт/кг.}$$

Соответственно, удельный допустимый тепловой поток для псевдооживленного слоя семян не должен превысить:

$$Q_{л} = \frac{Q_{п} H}{f h_i}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где  $H, h_i$  – высота псевдооживленного слоя и глубина поглощения ИК-энергии семян;  $f$  – удельная поверхность семян, м<sup>2</sup>/кг.

Приравняв правые части (1) и (2) получим:

$$T = \sqrt[4]{\frac{Q_{л} + \varepsilon_{пр} \sigma \left(\frac{\theta_k}{100}\right)^4}{\varepsilon_{пр} \sigma}} \cdot 100. \quad (3)$$

Подставляя  $T_{ис}$  в (1) получим мощность ИК-источника:

$$Q_{ис} = \varepsilon_{пр} \sigma \left[ \left(\frac{T_{ис}}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_k}{100}\right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2. \quad (4)$$

Зависимости  $T_{ис}$  и  $Q_{ис}$  от  $\theta_k$  приведены на рисунке 1.

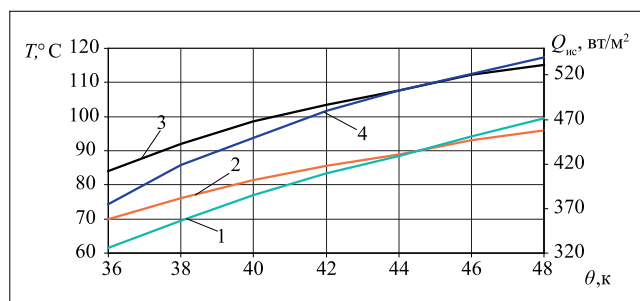


Рис. 1. Зависимость температуры  $T_{ис}$  (1, 4) и мощности ИК-излучателя  $Q_{ис}$  (2, 3) от конечной температуры семян  $\theta_k$   
 Fig. 1. Dependence of the temperature  $T_{ис}$  (1, 4) and the power of the IR emitter  $Q_{ис}$  (2, 3) on the final seed temperature  $\theta_k$

Для расчета величины подогрева воздуха при комбинированной сушке вследствие дефицита ИК-мощности предварительно определим коэффициент лучистой теплоотдачи  $\alpha_{л}$ :

$$\alpha_{л} = \frac{Q_{ис}}{T_{ис} - \theta_k}, \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи для конвективной сушки семян в псевдооживленном слое можно определить из уравнения [10]:

$$Nu = 0,62 Re^{0,5},$$

где  $Nu, Re$  – коэффициенты Нуссельта и Рейнольдса.

Из уравнения (5) получим:

$$\alpha_k = \frac{Nu \lambda}{d_3},$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала, Вт/м  $^\circ\text{C}$ ;  $d_3$  – эквивалентный диаметр семян.

Эквивалентный коэффициент комбинированной ИК-сушки составит:

$$\alpha_3 = \alpha_k + \alpha_{л}.$$

Количество тепла, переданного семенам подогретым воздухом, можно записать как:

$$Q_k = \alpha_3 \Delta T + Q_{ис}, \text{ Вт/м}^2, \quad (6)$$

где  $\Delta T$  – степень нагрева воздуха,  $^\circ\text{C}$ .

Из уравнения (6) получим:

$$\Delta T = \frac{Q_k - Q_{ис}}{\alpha_3}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7)$$

где  $Q_k$  можно записать в виде:

$$Q_k = \frac{\Delta U r H}{f h \eta}, \text{ Вт/м}^2, \quad (8)$$

где  $\Delta U$  – влагосъем, кг вл./кг сух. мат;  $r$  – удельные затраты тепла на испарение влаги, кДж/кг;  $\eta$  – доля теплоты, пошедшей на испарение влаги.

Зависимость  $\Delta T$  от влажности семян показана на рисунке 2.

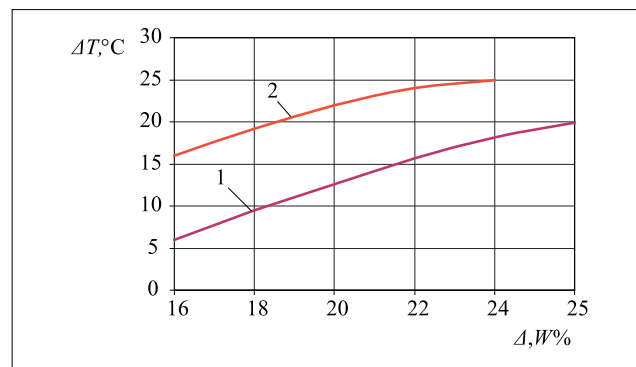


Рис. 2. Зависимость степени подогрева воздуха  $\Delta T$  от влажности семян: 1 –  $H = 0,1$ ; 2 –  $H = 0,18$ .

Fig. 2. Dependence of the degree of air heating  $\Delta T$  on  $W$  (the moisture content of seeds): 1 –  $H = 0,1$ ; 2 –  $H = 0,18$ .

При решении уравнения (7) был сделан ряд допущений, поэтому для проверки достоверности данных формул провели эксперимент. Конструкция лабораторной установки включала цилиндрическую кассету диаметром 0,12 м, ИК-лампу с отражателем мощностью 400 Вт, вентилятор, калорифер для высушивания семян пшеницы наружным и подогретым воздухом при непрерывном воздействии ИК-лучей. Семена высушивали подогретым воздухом и с отключенной ИК-лампой. Толщина осажденного слоя в опытах составила 0,1 и 0,18 м. Семена увлажняли до 20 и 24%. Скорость агента сушки обеспечивала устойчивое псевдооживление с отношением:

$$K = \frac{V_{п}}{V_{кр}} = 1,2-1,3,$$

где  $V_{п}$ ,  $V_{кр}$  – фактическая и критическая скорость агента сушки. В опытах изменяли интенсивность ИК-излучения, степень нагрева и расход воздуха, измеряли температуру поверхности источника и его мощность.

Определив влажность семян и предельно допустимую температуру нагрева по уравнениям (3) и (4), рассчитывали температуру и мощность ИК-источника. Во время эксперимента измеряли влажность и температуру семян каждые 5-10 мин. До и после опыта отбирали семена для проверки их на всхожесть.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** При ИК-сушке семена практически сразу (через 5-10 мин) приобретают температуру, близкую к конечной, в то время как при конвективной сушке прогрев затягивается до 30 мин. Псевдооживление при соотношении

$$K = \frac{V_{п}}{V_{кр}} = 1,3$$

позволяет обеспечить удовлетворительное перемешивание семян без выбросов в надслоевую полость. Установлено, что с увеличением высоты псевдооживленного слоя для поддержания заданной температуры семян необходимо повысить температуру и мощность ИК-источника практически пропорционально высоте.

С повышением влажности семян из-за снижения предельно допустимой температуры нагрева снижают температуру и мощность источника. Полученные зависимости влажности  $W$  и температуры  $\theta$  семян при ИК-сушке позволяют судить об эффективности комбинированного режима с подогревом агента сушки. Подогрев агента сушки для зерна влажностью 20% составил 12°C при высоте слоя  $H=0,1$  м, а при высоте  $H=0,18$  м – 22°C (рис. 3).

Интенсивность ИК-сушки при непрерывной подаче энергии достаточно низкая, для ее интенсификации требуется подогрев воздуха. При расчете степени подогрева воздуха необходимо принять во внимание эквивалентный коэффициент теплоотдачи и дефицит тепла для нагрева семян до нормативной температуры. С учетом этих параметров при известных плотности ИК-потока, конечной температуре семян и толщине слоя можно рассчитать необходимую температуру подогрева наружного воздуха (рис. 2).

График зависимости влажности семян при комбинированной сушке от времени не отличается от

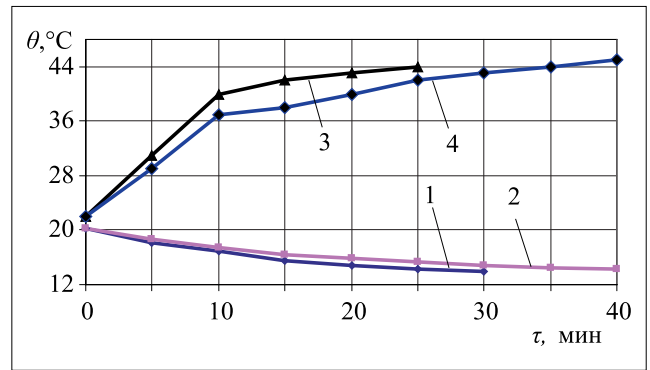


Рис. 3. Зависимость влажности  $W$  (1,2) и температуры семян  $\theta_k$  (3,4) от времени  $\tau$  при комбинированной сушке: 1,3 –  $H=0,1$ ; 2,4 –  $H=1,8$  м

Fig. 3. Dependence of humidity  $W$  (1,2) and seed temperature  $\theta_k$  (3,4) on time  $\tau$  in combined drying: 1,3 –  $H=0,1$ ; 2,4 –  $H=1,8$  m

классического – для конвективной сушки, но температура семян увеличивается быстрее, что является отличительным признаком ИК-сушки (рис. 3).

При сопоставимой температуре нагрева семян максимальная длительность процесса установлена для ИК-сушки, менее длительны процессы конвективной и комбинированной сушки, причем длительность комбинированной на 12% меньше конвективной при полном сохранении качественных показателей семян.

При высушивании семян влажностью 20% с высотой слоя 0,1-0,18 м вклад ИК-энергии в комбинированную сушку составляет 25-30%.

Проведенные экспериментальные работы показали соответствие разработанной модели расчета и температуры мощности ИК-излучателя для комбинированной сушки. Отклонения рассчитанной температуры нагрева семян от действительной не превышают  $\pm 10\%$ .

**Выводы.** Температуру поверхности и мощность ИК-излучателя устанавливают в зависимости от высоты слоя, физико-механических и радиологических свойств семян, допустимого теплосодержания и тепла, затраченного на испарение влаги.

Величина степени нагрева воздуха при комбинированной ИК-сушке пропорциональна дефициту мощности ИК-излучателя и обратно пропорциональна эквивалентному коэффициенту теплоотдачи.

Установлено, что экспозиция комбинированной сушки на 12% ниже конвективной за счет интенсификации процесса при полном сохранении качественных показателей семян.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sagar V.R., Kumar P. Suresh. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review // *J Food Sci Technol*. 2010; 47(1). 15-26.
2. Land van't C.M. *Dryin in the Process Industry*. First edition. John Wiley & Sons. 2012. 381.
3. Голубкович А.В., Павлов С.А. Совершенствование





технологии сушки семян и зерна повышенной влажности // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. N3. С. 21-23.

4. Безбах И.В., Воскресенская Е.В. Повышение энергоэффективности технологической линии с применением комбинированного способа сушки // *Наук. Праці ОНАХТ*. 2008. Вип. 32. С. 86-92.

5. Голубкович А.В., Павлов С.А., Лукин И.Д., Машковцов М.Ф. Расчет параметров осциллирующей сушки зерна в мобильной зерносушилке // *Тракторы и сельхозмашины*. 2013. N5. С. 28-29.

6. Алтухов И.В., Огиров В.Д., Федотов В.А. Определенные скорости нагрева топинамбура при сушке инфракрасным излучением // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2013. N1. С. 14-15.

7. Голубкович А.В., Павлов С.А., Гришин А.А. Исследование изотермического режима сушки семян в реверсивной сушилке // *Механизация и электрификация сель-*

*ского хозяйства*. 2014. N3. С. 7-9.

8. Рудобашта С.П., Проничев С.А. Организация осциллирующего режима ИК-сушки зерна с помощью информационно-измерительной и управляющей системы // *Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья*. 2006. N8. С. 72-75.

9. Рудобашта С.П., Григорьев И.В. Импульсная инфракрасная сушка семян овощей, нетрадиционных и редких растений // *Промышленная теплотехника*. 2011. N33(8). С. 85-90.

10. Анискин В.И., Окунь Г.С. Технологические основы оценки работы сушильных установок. М.: ВИМ. 2013. 167 с.

11. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Зюлин А.Н. Разработка и внедрение высокоэффективных, ресурсо- и энергосберегающих технологий и технических средств послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. N1. С. 2-9.

## REFERENCES

1. Sagar V.R., P. Suresh Kumar. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *J Food Sci Technol*. 2010. N47(1). 15-26.

2. C.M. van't Land. Drying in the Process Industry. First edition. John Wiley & Sons. 2012. 381.

3. Golubkovich A.V., Pavlov S.A. Sovershenstvovaniye tekhnologii sushki semyan i zerna povyshennoy vlazhnosti [Improving the technology of drying seed and grain of high humidity]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2011. N3. 21-23. (In Russian).

4. Bezbakh I.V., Voskresenskaya Ye.V. Povysheniye energoeffektivnosti tekhnologicheskoy linii s primeneniye kombinirovannogo sposoba sushki [Increasing the energy efficiency of the technological line with application of a combined method of drying]. *Nauk. Pratsi ONAKhT*. 2008. Issue 32. 86-92.

5. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Lukin I.D., Mashkovtsov M.F. Raschet parametrov ostsiliruyushchey sushki zerna v mobil'noy zernosushilke [Calculating the parameters of oscillating grain drying in a mobile grain dryer]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2013. N5. 28-29. (In Russian).

6. Altukhov I.V., Ogirov V.D., Fedotov V.A. Opredeleniye skorosti nagreva topinambura pri sushke infrakrasnym izlucheniye [Determination of the heating rate of Jerusalem artichoke for drying by infrared radiation]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2013. N1. 14-15. (In Russian).

7. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Grishin A.A. Issledovaniye

izotermicheskogo rezhima sushki semyan v reversivnoy sushilke [Studying the isothermal mode of drying seeds in a reversible dryer]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2014. N3. 7-9. (In Russian).

8. Rudobashta S.P., Pronichev S.A. Organizatsiya ostsiliruyushchego rezhima IK-sushki zerna s pomoshch'yu informatsionno-izmeritel'noy i upravlyayushchey sistemy [Arranging the oscillating mode of the infrared drying of grain using an information-measuring and control system]. *Khraneniye i pererabotka sel'skokhozyaystvennogo syr'ya*. 2006. N8: 72-75. (In Russian).

9. Rudobashta S.P., Grigor'yev I.V. Impul'snaya infrakrasnaya sushka semyan ovoshchey, netraditsionnykh i redkikh rasteniy [Impulse infrared drying of seeds of vegetables, non-traditional and rare plants]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2011. N33(8). 85-90. (In Russian).

10. Aniskin V.I., Okun' G.S. Tekhnologicheskiye osnovy otsenki raboty zasushlivykh ustanovok [Technological basics of assessing the performance of arid installations]. М.: ВИМ. 2013. 163. (In Russian).

11. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Zyulin A.N. Razrabotka i vnedreniye vysokoэффективnykh, resurso- i energosberegayushchikh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv posleuborochnoy obrabotki zerna i podgotovki semyan [Development and introduction of highly effective, resource and energy-saving technologies and technical means of postharvest grain processing and seed preparation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2009. N1. 2-9. (In Russian).

**Статья поступила в редакцию 03.04.2018**

**The paper was submitted to the Editorial Office on 03.04.2018**

**Конфликт интересов.**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Статья принята к публикации 25.05.2018**

**The paper was accepted for publication on 25.05.2018**

**Conflict of interest.**

The author declares no conflict of interest.