

## Периодическая сушка зерна повышенной влажности

**Александр Викторович Голубкович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация, e-mail: vim@vim.ru;  
**Иван Дмитриевич Лукин**, главный инженер, Кировская машиноиспытательная станция, п.г.т. Оричи, Кировская область, Российская Федерация

Исследовали зерно повышенной влажности, характеризующееся исходной неравномерностью этого показателя. (*Цель исследований*) Расчет и экспериментальная проверка пропускной способности установки для сушки зерна с невыравненной исходной влажностью и вместимости бункера отлежки. В сушилках непрерывного действия неравномерность сушки не столь велика, как в сушилках периодического действия. Высушиваемое зерно подвергается в них перемешиванию в выпускных и транспортирующих устройствах. Степень перемешивания, а следовательно, и степень выравнивания высушенной зерновой массы по влажности зависят от типа и конструкции этих устройств, но влагосодержание отдельных зерновок при этом не выравнивается. (*Материалы и методы*) Отметили, что наиболее эффективно равномерность сушки достигается при рециркуляционном способе. Его в сельском хозяйстве используют редко, но циркуляционный – часто, особенно в периодической сушке. При циркуляционной сушке зерна в надсушильном бункере происходит отлежка, в которой выравнивается влагосодержание отдельных зерновок. Осуществили математическое моделирование процесса сушки зерна с повышенной исходной неравномерностью, при допущении, что влагосодержание выравнивается посредством контактного массопереноса. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что при сушке зерна с повышенной неравномерностью по влажности для получения кондиционного зерна необходимо снизить пропускную способность установки или оснастить ее бункером отлежки с повышенной вместимостью зерна. (*Выводы*) Получили, что пропускная способность периодической установки по зерну – функция вместимости бункера отлежки, скорости контактного массопереноса, количества циклов и неравномерности исходного влагосодержания зерна. Вычислили, что вместимость бункера отлежки равна произведению исходной неравномерности сушки и вместимости сушильной камеры, разделенному на скорость контактного массопереноса. Провели хозяйственную проверку сушки зерна с невыравненной исходной влажностью.

**Ключевые слова:** неравномерность сушки, зерно, контактный массоперенос, отлежка зерна.

**Для цитирования:** Голубкович А.В., Лукин И.Д. Периодическая сушка зерна повышенной влажности // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Том. 12. №2. С. 9-13. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-2-9-13

## High Humidity Grain Periodic Drying

**Aleksandr V. Golubkovich**, Dr. Sc. (Eng.), chief researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation, e-mail: vim@vim.ru;  
**Ivan D. Lukin**, Chief engineer, Federal state institution Kirov State Zonal Machine-testing Station, Orichi, Kirov region, Russian Federation

Grain of high humidity, as a rule, is characterized by the excessive non-homogeneity of this indicator. (*Purpose of research*) Calculation and experimental verification of the handling capacity of the grain drying facility with the original unaltered humidity and the capacity of the binning bunker. In the dryer of continuous functioning uneven drying is not as large as in the dryer of periodic action, the dried grain is get mixed in the reloading and transporting devices. The degree of mixing, and hence the degree of equalization of the dried grain mass by humidity depend on the type and design of these devices, but the moisture content of individual grains is not equalized. (*Materials and methods*) It was noted that the most effective drying uniformity is achieved by recycling method. It is used in agriculture rarely, but circulation method is used often, especially in periodical drying. During circulating drying of grain in the over-drying bunker there is a bin, in which the moisture content of individual grains is leveled. Assuming that the moisture content is leveled by means of contact mass transfer, mathematical modeling of the grain drying process with higher initial unevenness is carried out. (*Results and discussion*) It was found that, when one dries grain with less homogeneous humidity, to obtain high quality grain, it is necessary to reduce the input bandwidth of the plant or equip it with a bin with a higher grain capacity. (*Conclusions*) The input bandwidth capacity of the periodic plant for grain is a function of the capacity of the brew hopper, the speed of the

contact mass transfer, the number of cycles and the unevenness of the initial moisture content of the grain. The capacity of the binning hopper is equal to the product of the initial irregularity of the drying, and the capacity of the drying chamber divided by the contact mass transfer. Business analysis of grain drying with unaligned initial humidity is done.

**Keywords:** non-uniformity of drying, the grain, the contact mass-transfer, binning of grain.

■ **For citation:** Golubkovich A.V., Lukin I.D. High humidity grain periodic drying // *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tehnologii*. 2018; Vol. 12; 1: 9-13. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-2-9-13. (In Russian)

**В**лажность свежубранного зерна зависит от способа и времени уборки, метеорологических условий уборочного периода и других факторов и может колебаться в широких пределах (у зерновых культур – от 10 до 35%). При этом колебания средней влажности зернового вороха, поступающего с одного поля в течение дня, могут быть значительными. Зерновой урожай обычно убирают при средней влажности зерна 13-23%. Однако влажность отдельных зерен будет значительно отличаться от среднего значения [1].

В сушилках непрерывного действия неравномерность сушки не столь велика, как в сушилках периодического действия. Высушенное зерно подвергается в них перемешиванию в выпускных и транспортирующих устройствах и при инвертировании. Степень перемешивания, а следовательно, и степень выравнивания высушенной зерновой массы по влажности зависят от типа и конструкции этих устройств. В литературе имеются некоторые данные по невыравненности высушенной зерновой массы по влажности отдельных зерен [2-4]. Чем выше неравномерность исходного материала, тем более невыравненным оказывается он после сушки, хотя варьирование влажности отдельных зерен уменьшается. Однако размах крайних отклонений остается высоким.

Большое влияние на выравнивание влажности в зерновых смесях оказывает температура [5, 6]. Это объясняется резким возрастанием давления пара над поверхностью влажных зерен по сравнению с аналогичным показателем пара над поверхностью сухих зерен. Кроме того, с повышением температуры интенсифицируется внутренний влагоперенос в сыром зерне. Влагообмен протекает интенсивно в начале процесса. Постепенно скорость перемещения влаги снижается. Чем больше начальная разница по влажности двух компонентов зерновой смеси, тем интенсивнее происходит перераспределение влаги.

Изучение влагообмена между сырым и сухим зерном пшеницы и гороха при различных температурах зерновой смеси и соотношении компонентов показало, что интенсивность перераспределения влаги незначительно зависит от площади контакта зерен, а влагообмен происходит путем десорбции и сорбции водяных паров [7].

Ряд исследований проведен применительно к

технологическому процессу рециркуляционных сушилок [8]. Установлено, что влагообмен между сырым и интенсифицируется с увеличением температуры рециркулирующего зерна, кратности рециркуляции и влажности сырого зерна. Результаты этих исследований позволяют проводить расчеты процессов контактного массообмена, в частности, обосновать рациональное время пребывания зерна в тепловлагообменнике и определить его размеры.

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что при начальной разности температуры смешиваемого зерна в пределах 30-50°C и разности во влажности в пределах 10% выравнивание температуры смеси наступает уже в через 1,5-2 мин, а перераспределение влаги происходит со значительно меньшей скоростью [9, 10].

Рециркуляционный способ сушки в сельском хозяйстве используют достаточно редко, но циркуляционный – часто, особенно в периодической сушке. При этом в надсушильном бункере влагосодержание отдельных зерновок выравнивается в период отлежки.

**Цель исследования** – расчет и экспериментальная проверка пропускной способности установки для сушки зерна с невыравненной исходной влажностью и вместимости бункера отлежки.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Физические основы решения задачи:

- перераспределение влаги между зерновками происходит в период отлежек;
- скорость контактного массопереноса рассчитываем по средним значениям температуры и влажности зерна;
- потерями тепла в камере отлежки пренебрегаем;
- максимальный влагосъем зерна между отлежками не должен превышать  $\Delta U \leq 0,04$  кг/кг, что исключит неравномерность влажности зерна в процессе сушки;
- отлеживается перемешанное зерно.

Длительность  $\tau$  перераспределения влаги между зерновками при отлежках запишем в виде:

$$\tau_{от} = \frac{\Delta U'}{V_k}, \text{ ч}, \quad (1)$$

где  $\Delta U'$  – неравномерность зерна по влажности (сушки) ( $\Delta U' = U'_{max} - U'_{min}$ , где  $U'_{max}$ ,  $U'_{min}$  – максимальное и минимальное влагосодержание исходного зерна, кг вл./кг сух. мат.);  $v_k$  – скорость кон-



тактного массопереноса, кг вл./кг сух. мат.·ч.

Известно, что для условий отлежки при средней температуре зерна 35-38°C скорость контактного массопереноса  $v_k = 0,03$  кг/кг·ч [11].

Найдем количество циклов в сушилке  $K$ , при которых влажность высушенного зерна не превысит допустимую неравномерность  $\delta \leq \pm 1,5\%$ :

$$K = \frac{U_{н.сп} - U_k}{\Delta U_{ц}}, \quad (2)$$

где  $U_{н.сп}$ ,  $U_k$  – среднее начальное  $U_{н.сп} = \frac{U'_{max} - U'_{min}}{2}$

и конечное влагосодержание зерна, кг вл./кг сух. мат.;  $\Delta U_{ц}$  – допустимый влагосъем за цикл ( $\Delta U_{ц} \leq 0,04$  кг/кг).

Длительность сушки в цикле запишем в виде [12]:

$$\tau_i = \frac{\Delta U_{ц} r H}{\alpha f (t - \theta_{cp}) \eta h_i}, \quad (3)$$

где  $r$  – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг;  $H$ ,  $h_i$  – реальная высота слоя зерна, м, и элементарная высота ( $2-3d_3$ ) м;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·°C;  $f$  – удельная поверхность частиц, м<sup>2</sup>/кг;  $t$  – температура агента сушки;  $\theta_{cp}$  – средняя температура частиц, °C;  $\eta$  – доля теплоты, затраченная на испарение влаги;  $d_3$  – элементарный диаметр зерновки, м.

Длительность нахождения зерна в бункере отлежки  $\tau_{от}$  можно записать в виде:

$$\tau_{от} = \frac{G_{от} K}{\Pi}, \quad (4)$$

где  $G_{от}$  – вместимость бункера отлежки, кг;  $\Pi$  – пропускная способность циркулирующего средства, кг/ч.

Приравняв правые части выражений (1) и (4), получим величину вместимости бункера отлежки:

$$G_{от} = \frac{\Delta U' \Pi}{V_k K}, \quad (5)$$

Приняв во внимание, что

$$\Pi = \frac{G_k}{K \tau_i}, \quad (6)$$

где  $G_k$  – вместимость сушильной камеры, т, окончательно получим:

$$G_{от} = \frac{\Delta U' G_k}{V_k \tau_i K^2}, \quad (7)$$

При известной вместимости надшахтного бункера можем определить пропускную способность установки:

$$\Pi = \frac{G_{от} V_k K}{\Delta U'}, \quad (7)$$

Исследования по сушке проводили в мобильной зерносушилке SSI25/21T2, которая находится в хо-

зяйстве ООО «Агрофирма Коршик» Оричевского района Кировской области (рис. 1).

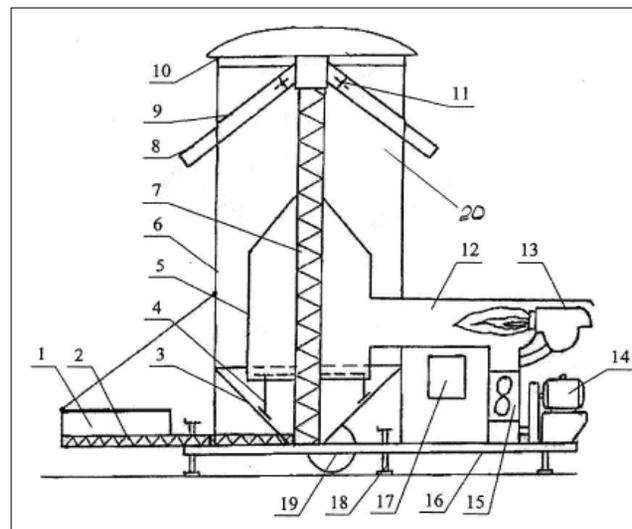


Рис. 1. Технологическая схема зерносушилки SSI25/21T2:

1 – приемный бункер; 2 – шнек; 3 – днище; 4 – механизм смешивания; 5 – внутренний цилиндр; 6 – наружный цилиндр; 7 – вертикальный шнек; 8 – лоток; 9 – выгрузная труба; 10 – зонтик; 11 – заслонка; 12 – камера сгорания; 13 – горелка; 14 – электродвигатель; 15 – вентилятор; 16 – рама; 17 – пульт управления; 18 – опора; 19 – колесо колесного хода; 20 – емкость между наружным и внутренним цилиндрами

Fig. 1. Technological scheme of the dryer:

1 – receiving hopper; 2 – screw; 3 – bottom; 4 – mixing mechanism; 5 – internal cylinder; 6 – external cylinder; 7 – vertical screw; 8 – tray; 9 – discharge pipe; 10 – umbrella; 11 – flap; 12 – combustion chamber; 13 – burner; 14 – electric motor; 15 – fan; 16 – frame; 17 – control panel; 18 – support; 19 – travel wheel; 20 – capacity between external and internal cylinders

**Описание технологического процесса.** Зерно подается в приемный бункер зерносушилки, откуда горизонтальным шнеком транспортируется к циркулирующему (вертикальному) шнеку, которым зерно подается в емкость 20 объемом 34 м<sup>3</sup> (25 т по пшенице) между наружным и внутренним цилиндрами. После заполнения зерносушилки включается в работу энергоблок. Смесь топочных газов и наружного воздуха поступает во внутренний цилиндр и через его перфорацию в зерновую массу, сушит ее и выводится наружу. Вертикальный шнек работает непрерывно, перемещая материал снизу вверх и перемешивая его. После достижения заданной влажности партией зерна, загруженного в зерносушилку, горелка автоматически отключается, при этом продолжается вентилирование высушенного зерна наружным воздухом.

**Программа исследований.** Проведены два опыта по сушке партий зерна повышенной исходной влажности: фуражной смеси (пшеница + рожь + овес) и фуражного зерна пшеницы.

Максимальная исходная влажность фуражной смеси составила:  $W'_н = 28\%$  ( $U'_{\max} = 0,39$  кг/кг), минимальная –  $W'_к = 22\%$  ( $U'_{\min} = 0,28$  кг/кг). Средняя исходная влажность:  $W_{н.ср} = 25\%$  ( $U_{н.ср} = 0,33$  кг/кг), конечная –  $W_н = 13\%$  ( $U_к = 0,15$  кг/кг).

Высушивали зерно пшеницы со средней исходной влажностью также  $W'_н = 24\%$  ( $U_н = 0,32$  кг/кг), конечной –  $W_к = 13\%$  ( $U_к = 0,15$  кг/кг);  $W'_н = 25,8\%$  и  $W'_к = 23,2\%$ ;  $\Delta U' = 0,05$  кг/кг (смесь зерна) и  $\Delta U' = 0,02$  кг/кг (монофракции).

Параметры зерна и опыта составили:  $f = 1,0$  м<sup>2</sup>/кг;  $\eta = 0,85$ ; коэффициент  $\alpha = 15$  Вт/м<sup>2</sup>·°C;  $t = 100$ °C;  $\theta_{ср} = 40$ °C;  $h_1 = 0,01$  м;  $\Delta U_{ц} = 0,03$  кг/кг.

Вместимость надшахтного бункера сушилки ~2,5 т. Скорость контактного массопереноса (при средней влажности и средней температуре зерна ~40°С);  $V_к = 0,04$  кг/кг·ч, толщина слоя  $H = 0,25$  м.

При загрузке сушилки периодически определяли влажность и неравномерность по влажности материала. В процессе сушки записывали температуру, агента сушки, поступающего в сушильную камеру, и температуру зерна на выходе из сушильной камеры. Каждые 30 мин отбирали навески у материала на выходе сушильной камеры и определяли его влажность и температуру. Скорость агента сушки составила 0,4 м/с. Неравномерность сушки характеризовали предельными отклонениями от средней величины влажности материала. Неравномерность сушки определяли при загрузке сушилки и в процессе сушки каждые 30 мин, отбирая 5-7 кг материала; из которых брали 10 навесок зерна и влагомером определяли влажность.

Пропускная способность рециркулирующего шнека была рассчитана по уравнению (7) и составила ~ 5,5 и 13 т/ч.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Зависимость влажности  $W$  и температуры  $\theta$  зерна от времени  $\tau$  приведена на рисунке 2. До влажности  $W \approx 22\%$  имеем первый период сушки с медленным ростом  $\theta$ , затем второй период – с быстрым возрастанием  $\theta$ . В первом периоде скорость сушки постоянна, затем быстро снижается.

Кривые сушки материала различной исходной влажности по конфигурации практически не отличаются, но температурная кривая зерна с большей исходной неравномерностью расположена на графике ниже, чем с меньшей, так как на испарение зерна с большим влагосодержанием требуется больше теплоты.

Зависимость неравномерности сушки от времени приведена на рисунке 3. Крутое снижение неравномерности сушки  $\Delta U'$  для первого случая очевидно объясняется выравниванием неравномерности за счет подсушки более влажных фракций смеси в первом периоде. Однако во втором периоде начиная с влажности  $W < 22\%$  снижение неравномерно-

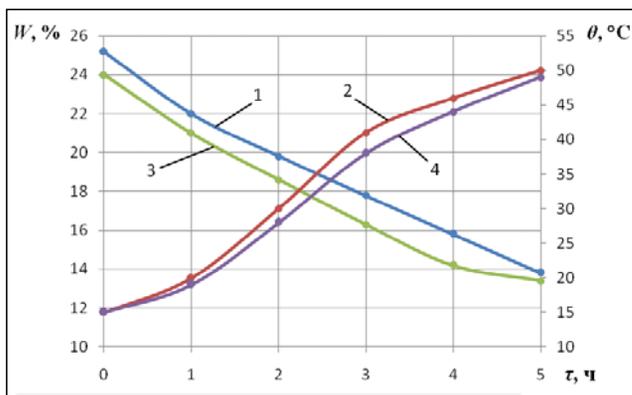


Рис. 2. Зависимость влажности  $W$  (1, 3) и температуры зерна  $\theta$  (2, 4) от времени  $\tau$ : 1, 4 – смесь зерна; 2, 3 – монофракция зерна

Fig. 2. The dependence of the moisture content  $W$  (1, 3) and grain temperature  $\theta$  (2, 4) on time  $\tau$ : 1, 4 – grains mixture; 2, 3 – grain mono-fraction

сти сушки обусловлено контактным массопереносом и сопоставимо для двух рассмотренных случаев. Пропускная способность, рассчитанная по уравнению (7), позволит получить на выходе высушенное зерно не хуже  $\Delta U' < 0,02$  кг/кг.

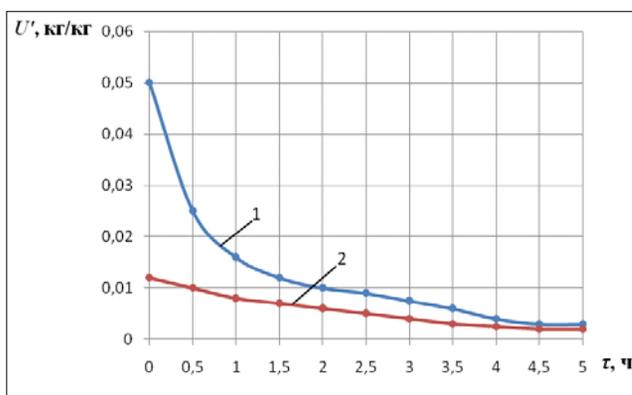


Рис. 3. Зависимость неравномерности сушки  $\Delta U'$  от времени  $\tau$ : 1 – смесь зерна; 2 – монофракция зерна

Fig. 3. The dependence of non-uniformity of drying  $\Delta U'$  on time  $\tau$ : 1 – mixture of grain; 2 – grain mono-fraction

## Выводы

Исходную неравномерность зерна по влажности при циркуляционной сушке в установках периодического действия выравнивают в период отлежек в надсушильном бункере.

Установлено, что при сушке зерна с повышенной неравномерностью по влажности для получения кондиционного зерна необходимо снизить пропускную способность установки, а при желании – сократить ее паспортную производительность, оснастив бункером отлежки зерновой вместимостью, рассчитанной по уравнению (6).

Пропускная способность периодической установки по зерну есть функция вместимости бунке-



ра отлежки, скорости контактного массопереноса, количества циклов и неравномерности исходного влагосодержания зерна.

Вместимость бункера отлежки равна произве-

дению исходной неравномерности сушки и вместимости сушильной камеры, деленному на скорость контактного массопереноса.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Птицын С.Д. Зерносушилки. Технологические основы, тепловой расчет и конструкции. М.: Машиностроение, 1966. С. 39-40.  
 2. Авдеев А.В. Разработка и промышленное освоение типоразмерного ряда высокоэффективных полнокомплектных блочно-модульных шахтных зерносушилок (ШКЗ) открытого исполнения // *Современные энергосберегающие тепловые технологии* (сушка и термовлажностная обработка материалов): Труды конференции. Т. 4. М.: МГАУ, 2002. С. 20-29.  
 3. Агафонов Е.Я. Влияние искусственной сушки на семенные качества пшеницы // *Советская агрономия*. М.: Сельхозгиз, 1940. 12 с.  
 4. Анискин В.И., Окунь Г.С., Чижиков А.Г. Гигроскопические свойства зерна различных культур // *Элеваторная промышленность*. М.: ЦИНТИ Госкомзага СССР, 1967. С. 29-35.  
 5. Kelermann C. Das Verschneiden von feuchtem und trockenem Getreide bei der Satz Trockung // *Wissenschaftliche Berichte der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn*. 1964; 12: С. 17-19.

6. Гинзбург А.С. Технология сушки пищевых продуктов // *Пищевая промышленность*. М.: 1976. 246 с.  
 7. Ларина Е.И., Резчиков В.А., Молодцова Е.М. Экспериментальное исследование теплообмена в процессе рециркуляционной сушке зерна // *Труды ВНИИМЭ*. М.: 1967, С. 34-46.  
 8. Любошиц И.Л. Исследование комплекса нагрев-охлаждение в рециркуляционных сушилках с осциллирующим режимом // *Тепло- и массообмен в сушильных и термических процессах*: Сборник статей. Минск: Наука и техника, 1966. С. 19-25.  
 9. Резчиков В.А. Контактный влагообмен в зерне // *Влага в зерне*. М.: Колос, 1969. 224 с.  
 10. Резчиков В.А. Теплофизические и технологические методы повышения эффективности сушки зерна: Дис. ... докт. техн. наук. М.: МТИПП, 1988. 513 с.  
 11. Анискин В.И., Окунь Г.С. Технологические основы оценки работы зерносушильных установок. М.: ВИМ, 2003. 167 с.  
 12. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320 с.

**REFERENCES**

1. Ptitsyn S.D. The grain dryers. Technological bases, thermal conditions and designs. Moscow: Mechanical engineering, 1966: 39-40. (In Russian).  
 2. Avdeev A.V. Development and industrial development of a typical size range of high-performance complete block-modular mine grain dryers of open design // *Modern energy-saving thermal technologies (Drying and heat-and-moisture treatment of materials): Proceedings of conf. 4*. М.: МГАУ, 2002. 20-29. (In Russian).  
 3. Agafonov E.Y. The influence of artificial drying on seed quality of wheat // *Soviet agronomy*. М.: Selhozgiz, 1940: 12. (In Russian).  
 4. Aniskin V.I., Perch G.S., Chizhikov A.G. Hygroscopic properties of grains of different crops // *Elevator industry*. М.: CINTI State-kosuga USSR, 1967: 29-35. (In Russian).  
 5. Kelermann C. Das verschneiden von feuchtem und trockenem getreide bei der satztrockung // *Wissenschaftliche berichte der landwirtschaftlichen fakultät der universität Bonn*. 1964; 12: 17-19.  
 6. Ginsburg A.S. Drying technology of food products //

*Food Industry*. М.: 1976: 246. (in Russian).  
 7. Larina E.I., Rezchikov, V.A., Molodtsova E.M. Experimental study of the heat transfer process of recirculation in grain drying // *Proceedings of VNIIME*. М.: 1967: 34-46. (In Russian).  
 8. Lyuboshitz I.L. Investigation of a complex heating-cooling in recycled dryers with oscillating mode // *Heat and mass transfer in drying and thermal processes: Collection of articles*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1966: 19-25. (In Russian).  
 9. Rezchikov V.A. Contact moisture exchange in grain // *Moisture in grain*. М.: Kolos. 1969: 224. (In Russian).  
 10. Rezchikov V.A. Thermophysical and technological methods of increasing the efficiency of grain drying: Diss. ... doctor. tech. sciences'. М.: МТИП. 1988: 513. (In Russian).  
 11. Aniskin V.I., Okun G.S. Technological basis for the evaluation of the work of grain drying installations. М.: VIM. 2003: 167. (In Russian).  
 12. Sazhin B.C. Basics of drying techniques. М.: Chemistry, 1984: 320. (In Russian).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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