

Исследования сушки зерна в автоматизированном зерносушильном агрегате

Сергей Анатольевич Павлов¹,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: sapavlov777@mail.ru;

Татьяна Федоровна Фролова²,
ведущий инженер

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация,

²ООО «Особое конструкторское бюро по теплогенераторам», г. Брянск, Российская Федерация

Реферат. Шахтные и колонковые зерносушильные агрегаты – достаточно сложный объект управления в поточной линии. Процесс сушки зерна определяется большим числом параметров, количественно и качественно характеризующих работу агрегата. К ним относятся критерии максимума производительности и минимума отклонений влажности высушенного зерна от кондиционного значения. Эти критерии, как показывают исследования, связаны между собой: повышение производительности сушилки приводит к увеличению влажности выходящего из нее зерна, и наоборот, стремление уменьшить влажность зерна вызывает необходимость снижения производительности сушилки. (*Цель исследования*) Разработать уравнения передаточных функций управления расходом зерна в зависимости от возмущений исходной влажности и максимальной температуры зерна, а также провести экспериментальную их проверку. (*Материалы и методы*) Составили упрощенные математические модели компенсации возмущений влажности поступающего на сушку зерна и температуры его нагрева в камере сушки путем изменения производительности сушилки на основе теоретических и экспериментальных исследований. (*Результаты и обсуждения*) Получили выражения для управления производительностью процесса при изменении влажности и температуры через параметры производительности сушилки как функции стока влаги зерна и теплоты, потраченной на нагрев зерна до допустимой температуры. Осуществили хозяйственную проверку разработанных передаточных функций управления при испытаниях зерносушильного агрегата СЗТ-16, управляемого логическим контроллером S7-1200 Siemens и работающей в автоматическом режиме. Провели испытания в КФХ «Байбашев» Карачаевского района Брянской области на сушке зерна пшеницы продовольственного назначения. (*Выводы*) Подтвердили, что производительность сушилки определяется не только паспортной производительностью, но и отклонением исходного влагосодержания зерна, а также таким параметром, как отношение частей теплоты, затраченных на испарение и нагрев. При неизменной исходной влажности производительность сушилки определяется ее паспортной производительностью, максимальной заданной разностью температур зерна, а также отношением долей теплоты на нагрев и испарение.

Ключевые слова: зерно, сушка, автоматизация, алгоритмы управления.

■ **Для цитирования:** Павлов С.А., Фролова Т.Ф. Исследования сушки зерна в автоматизированном зерносушильном агрегате // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N4. С. 29-34. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-4-29-34

Study of Grain Drying in the Automated Grain Drying Unit

Sergey A. Pavlov¹,
Ph.D.(Eng), key research engineer,
e-mail: sapavlov777@mail.ru;

Tatiana F. Frolova²,
key research engineer

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²LLC “Special Design Bureau for Heat Generators”, Bryansk, Russian Federation

Abstract. Mine and column grain dryers are a fairly complex object of control in the production line. The process of grain drying is characterized by a large number of parameters, quantitatively and qualitatively characterizing the dryer operation. First of all, this includes the criteria of maximum performance and minimum deviations of the moisture content of the dried grain from the standard values. These criteria, as studies show, are interconnected with each other: an increase in the performance Π of the dryer leads to an increase in the moisture content of the grain coming out of it, and, conversely, an attempt to reduce the moisture content of grain causes the need to reduce the performance Π . (*Research purpose*) The research purpose is to develop

the expression for the transfer functions of the of grain flow control depending on perturbations of the initial moisture content and the maximum grain temperature, as well as to conduct experimental studies. (*Materials and methods*) The authors have developed simplified mathematical models of moisture perturbation compensation of grain coming in for drying and its heating temperature in a drying chamber by changing the dryer performance on the basis of theoretical-and-experimental studies. (*Results and discussion*). The authors have obtained expressions to control the process performance when the current humidity and temperature change through the dryer performance parameters as a function of grain moisture flow and heat used to grain heating up to an acceptable temperature. Farm tests of developed transition management functions have been implemented for dryer SZT-16 controlled by PLC S7-1200 Siemens and operating in an automatic mode. Tests have been conducted on the “Babachev” farm, Karachev district of the Bryansk region in the process of drying food wheat grain. (*Conclusion*) It has been confirmed that the dryer performance is determined not only by the rated capacity but also by the deviation of the current moisture content of grain from the specified values and by the ratio of the amount of heat used for evaporating and heating. The dryer performance at constant initial humidity is determined by its rated performance, the maximum specified difference of grain temperatures, as well as the ratio of the amounts of heat used for evaporating and heating.

Keywords: grain, drying, automation, control algorithms.

For citation: Pavlov S.A., Frolova T. F. Study of grain drying in the automated grain drying unit. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tehnologii*. 2018. 12(4): 0-0. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-4-0-0. (In Russian).

Автоматизация контроля и управления процессами сушки зерна открывает широкие возможности для повышения ее эффективности, снижения затрат труда и улучшения качества продукта.

Шахтные и колонковые зерносушилки – достаточно сложный объект управления в поточной линии. Процесс сушки зерна характеризуется большим числом параметров, количественно и качественно отражающих работу сушилки. Среди этих параметров – влажность зерна на входе и выходе из сушилки, ее производительность, температура нагрева зерна и агента сушки, подаваемого и обработанного в сушилке [1-7].

Из этой совокупности частных критериев к сушилке в первую очередь относятся критерии максимума производительности и минимума отклонений влажности высушенного зерна от кондиционного значения. Эти критерии, как показывают исследования, связаны между собой: повышение производительности (Π) сушилки приводит к увеличению влажности выходящего из нее зерна, и наоборот, стремление уменьшить влажность зерна W вызывает необходимость снижения (Π). Поскольку на зерно- и семяобработывающих предприятиях в соответствии с требованиями стандартов влажность полученных зерна и семян не должна превышать кондиционного значения, то критерий *min* W превращается в ограничение вида $W \leq W_{\text{кон}}$. Кроме того, процесс сушки семенного зерна должен отвечать требованию недопустимости снижения семенных качеств готовой продукции. Это требование в применении к зерносушилкам заключается в том, чтобы не допустить перегрева зерна, то есть температура θ зерна не должна превышать допустимого значения $\theta_{\text{доп}}$ [6, 11].

Таким образом, функцию оптимального управ-

ления часто выражают в виде:

$$\max \Pi = f(\theta, W, t), \quad (1)$$

где Π – производительность, т/ч; θ – температура зерна, °С; W – влажность зерна, %; t – температура агента сушки, °С.

При ограничениях:

$$W \leq W_{\text{кон}} \text{ и } \theta \leq \theta_{\text{доп}}. \quad (2)$$

Для описания процесса сушки в шахтных и колонковых сушилках разработан ряд математических моделей как на основе дифференциальных уравнений, так и найденных эмпирически, но в последнем случае для каждого конкретного объекта нужно экспериментально определять целый ряд параметров, что затруднительно [8, 9].

Цель исследования – разработать уравнения передаточных функций управления расходом зерна в зависимости от возмущений исходной влажности и максимальной температуры зерна, а также провести их экспериментальную проверку.

Материалы и методы. Производительность сушилки по массе испаренной влаги можно записать в виде:

$$\Pi = \frac{G(U_1 - U_2)}{\tau \eta}, \quad (3)$$

где Π – паспортная производительность сушилки, т/ч; G – масса зерна в сушилке, кг; U_1, U_2 – влагосодержание исходного и кондиционного зерна, кг вл./кг сух. мат.; τ – длительность сушки, ч; η – доля теплоты, пошедшей на испарение влаги.

Изменение производительности сушилки при отклонениях исходной влажности зерна:

$$\Pi_m = \frac{G(U_0 - U_1)}{\tau \eta},$$



где U_0 – текущее влагосодержание зерна, кг вл./кг сух. мат.; окончательный вариант записи текущей производительности:

$$\Pi_m = \Pi \frac{(U_0 - U_1)\eta}{(U_1 - U_2)\eta_1}, \quad (4)$$

где η_1 – доля теплоты, пошедшая на испарение влаги при отклонениях влажности.

Доля теплоты, пошедшей на испарение влаги, равна:

$$\eta = \frac{\Delta U r}{\Delta U r + \Delta \theta c},$$

где ΔU – разность влагосодержаний, кг вл./кг сух. мат.; $\Delta \theta$ – разность температур при сушке зерна, °С; c – теплоемкость зерна, кДж/кг исп. вл.; r – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг.

При существенном превышении текущей влажности U_0 над кондиционной (более 1-1,5%) сушилку переводят с потока на циркуляцию, при этом расход зерна прекращается, а ожидаемое время циркуляции можно определить по выражению:

$$\tau_{ц} = \tau \frac{U_0 - U_2}{U_1 - U_2}, \quad (5)$$

где τ – длительность сушки, ч.

Величину τ рассчитывают по известным U_1, U_2 и температурному режиму сушки для оценки времени перевода работы сушилки с циркуляции на поток [9, 10].

К основным параметрам, характеризующим тепловой режим зерносушилки, относятся температура подаваемого в сушильную камеру теплоносителя и температура нагрева зерна. С одной стороны, процесс сушки нужно вести таким образом, чтобы не превысить допустимую температуру нагрева зерна, а с другой – сушка происходит наиболее эффективно при предельных температурах его нагрева. Стремление к интенсификации процесса сушки привело к разработке различных систем автоматического регулирования (стабилизации) температуры нагрева зерна, в которых в качестве управляющих воздействий использовали изменение подачи топлива и экспозиции сушки (путем варьирования производительностью). Эти системы позволяют поддерживать заданную влажность зерна, но не предотвращают его пересушивания или избыточности влаги на выходе зерна.

Рассмотрим частную задачу изменения температуры зерна при постоянной исходной влажности. Производительность сушилки по теплоте, затраченной на сушку, можно записать следующим образом:

$$\Pi = \frac{G c (\theta_k - \theta_n) \eta_1}{\tau}, \quad (6)$$

где θ_k, θ_n – конечная и начальная температура зерна, °С.

При возмущениях температуры теплопроизводительность меняется согласно выражению:

$$\Pi_0 = \frac{G c (\theta'_k - \theta_k) \eta_2}{\tau}, \quad (7)$$

где θ'_k – текущая температура зерна, °С.

Текущая производительность сушилки составит:

$$\Pi_0 = \Pi \frac{(\theta'_k - \theta_k) \eta_2}{(\theta_k - \theta_n) \eta_1}. \quad (8)$$

При расчете θ'_k необходимо учесть расположение термодатчиков и инерционность нагрева зерна.

Полагая, что температура возрастает линейно по длине шахты, и максимальных значений она достигает на выходе шахты, целесообразно контролировать температуру зерна в верхних областях колонки, для чего, например, разместить термодатчик на входе последней сушильной секции и определить $\theta_{к0}$ и $\theta'_{к0}$, снизив их величину на:

$$\Delta \theta = \frac{\theta_k - \theta_n (n-1)}{n};$$

$$\theta_{к0} = \theta_k - \Delta \theta \text{ и } \theta'_{к0} = \theta'_k - \Delta \theta, \quad (9)$$

где n – число сушильных секций.

Хозяйственная проверка разработанных передаточных функций управления была проведена при испытаниях зерносушилки СЗТ-16, управляемой логическим контроллером *S7-1200 Siemens* и работающей в автоматическом режиме. Испытания проводили в КФХ «Байбашев» Карачаевского района Брянской области на сушке зерна пшеницы продовольственного назначения.

Контроллер был запрограммирован для конкретных 13 культур, в том числе рапса, сои, кукурузы. По эмпирическим зависимостям влажность зерна на входе и выходе измеряли влагомером Микрорадар-113. Температуру зерна определяли термометрами сопротивления. Управление производительностью зерносушилки проводили изменением частоты вращения разгрузочного устройства роторного типа, для чего на его приводе установлен частотный преобразователь.

Технологическая схема сушилки представлена на *рисунке 1*.

Устройство работает следующим образом. Влажное зерно первым потоком нории подают через клапан, который настроен на «поток» или на циркуляцию, во влагомер влажного зерна (на входе в сушилку), затем в сушилку, высушенное и охлажденное зерно разгружается роторами, привод которых настроен на заданный расход и через разгрузочное устройство вторым потоком нории поступает во влагомер на выходе и выводится из сушилки. Агенты сушки готовят в топке и через диффузор подают в сушилку.

На датчике устанавливают наименование культур

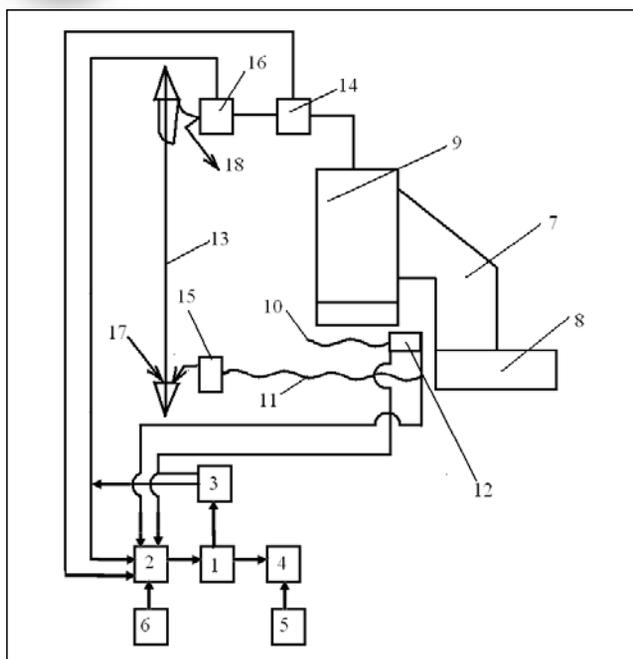


Рис. 1. Технологическая схема сушилки: 1 – микропроцессор; 2 – измеритель; 3 – блок коррекции; 4 – датчик; 5 – блок выбора зерновой культуры; 6 – блок коррекции паузы; 7 – диффузор сушилки; 8 – топка; 9 – сушилка; 10 – разгрузочные роторы; 11 – разгрузочное устройство; 12 – привод роторов; 13 – нория; 14 – влагомер на входе в сушилку; 15 – влагомер на выходе из сушилки; 16 – клапан перевода с циркуляции на поток. На схеме приведены направления движения влажного 17 и высушенного 18 зерна

Fig. 1. Technological scheme of the dryer: 1 – contains microprocessor; 2 – meter; 3 – correction unit; 4 – sensor; 5 – grain crop selection unit; 6 – pause correction unit; 7 – dryer diffuser; 8 – furnace; 9 – dryer; 10 – discharge rotors; 11 – discharge device; 12 – rotor drive; 13 – grain elevator; 14 – moisture meter at the dryer inlet to the; 15 – moisture meter at the dryer outlet; 16 – transfer valve from the circulation to flow mode. Also shown in the diagram are directions of movement of wet grain 17 and dried grain 18

туры, исходную и конечную влажность зерна, устройство входит в режим измерения влажности установленной культуры от влагомера 15, для компенсации внешних воздействующих факторов предусмотрен блок коррекции 3, в блоке 6 автоматически устанавливают расход зерна согласно выражению $V_i = K \cdot (W_i - W_{\min})$, где V_i – текущее значение аналогового сигнала, В; K – коэффициент перевода показателя влажности в аналоговый сигнал; W_i – текущее значение влажности измеряемой культуры, %; W_{\min} – минимальное значение влажности, %. Происходит изменение расхода зерна в зависимости от его влажности на выходе из сушилки.

При превышении влажности зерна относительно кондиционной происходит снижение расхода зерна от частоты вращения роторов, а затем, если зерно не достигает кондиционной влажности, устрой-

ство останавливается. По окончании паузы продолжительностью не менее 3 аналоговых сигналов от влагомера 15, необходимой для компенсации текущей неравномерности распределения влажности по зерну, прекращается разгрузка зерна, а устройство входит в режим циркуляции. По достижении кондиционной влажности циркуляция прекращается, а выгрузка зерна возобновляется.

Проведено два опыта с автоматической коррекцией частоты вращения роторов без циркуляции зерна во время паузы (рис. 2) и с периодической

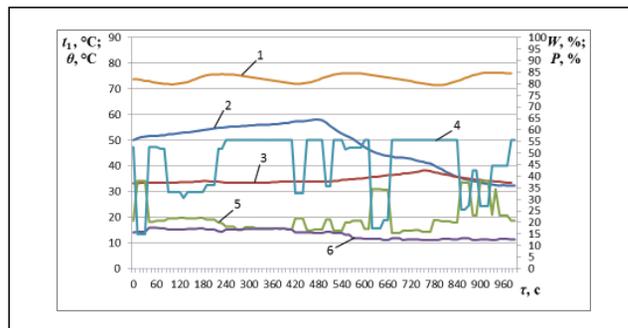


Рис. 2. Зависимость температуры (t, θ), частоты вращения роторов (P) и влажности зерна W от времени τ для зерносушилки СЗТ-16 с контроллером: 1 – температуры агента сушки; 2 – температуры зерна после сушки; 3 – перед сушкой; 4 – частоты вращения разгрузочных роторов; 5 – исходной влажности зерна; 6 – конечной влажности зерна
Fig. 2. Dependence of temperature (t, θ), rotor speed (P) and grain moisture W from time τ for dryer SZT-16 with controller 1 – drying agent temperature; 2 – grain temperature after drying; 3 – before drying; 4 – rotation speed of the unloading rotor; 5 – initial grain moisture; 6 – final grain moisture

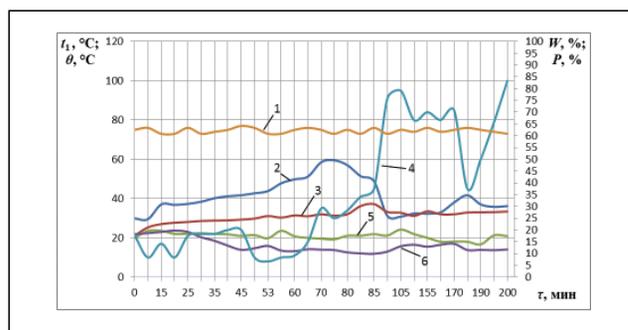


Рис. 3. Зависимость температуры (t, θ), вращения роторов (P) и влажности зерна W от времени τ для автоматизированной зерносушилки СЗТ-16: 1 – температуры агента сушки; 2 – температуры зерна после сушки; 3 – перед сушкой; 4 – частоты вращения разгрузочных роторов; 5 – исходной влажности зерна; 6 – конечной влажности зерна
Fig 3. Dependence of temperature (t, θ), rotor speed (P) and grain moisture W from time τ for the automated dryer SZT-16: 1 – drying agent temperature; 2 – grain temperature after drying; 3 – before drying; 4 – rotation speed of the unloading rotor; 5 – initial grain moisture; 6 – final grain moisture



Table		Таблица	
ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ СУШИЛКИ СЗТ-16 НА ПШЕНИЦЕ THE MAIN PERFORMANCE INDICATORS OF THE DRYER SZT-16 (WHEAT PROCESSING)			
Показатели работы Performance indicators	Значения показателей Indicators values		
	поточный режим, фон 1 Flow-line mode, background 1	с периодической циркуляцией, фон 2 With periodic circulation, background 2	
Производительность, т/ч Performance, tons/h	14,2	14,7	
Влажность зерна, %: Grain moisture, %			
– до сушки – before drying	19,7	21,4	
– после сушки – after drying	13,4	13,8	
Температура, °С: Temperature, °С:			
– теплоносителя – coolant	74	74,6	
– зерна на входе в сушилку – grain at the dryer inlet	25	20	
– зерна в зоне максимального нагрева – grain in the maximum heating zone	48	48	
– охлажденного зерна – cooled grain	34	32	
– наружного воздуха – external air	25	19	
Расход топлива (природный газ), м ³ /ч Fuel consumption (natural gas), m ³ /h	78	80,5	
Расход теплоносителя, м ³ /ч Coolant consumption, m ³ /h	35000	35000	
Удельный расход тепла, кДж/кг исп. вл. Relative heat consumption, kJ/kg evap. moist.	2560	2472	
Температура дымовых газов, °С Temperature of flue gases, °С	207	-	
Теплопроизводительность, МВт Heat productivity, MW	0,6	0,622	

циркуляцией (рис. 3).

Частота вращения роторов определена из расчета $\Pi = 32$ т/ч при $P = 100\%$. Основные показатели сушилки приведены в таблице.

Результаты и обсуждение. В первом опыте зерно высушивали с коррекцией его расхода согласно выражению $V_i = K(W_i - W_{min})$, заложенному в программу управления сушилкой. При отклонении влажности от кондиционной циркуляция зерна не использовалась [8-11]. Во втором опыте при отклонении конечной влажности от кондиционной использовали циркуляцию, что обусловило более высокую производительность сушилки.

Полученные экспериментальные данные сравнивали с расчетными по уравнениям (4) и (8), разработанным для упрощенной системы управления сушилкой по влажности и температуре зерна. Установлено, что результаты расчета производительности в зависимости от изменения исходной влажности или максимальной температуры зерна θ со-

ответствуют экспериментальным данным (с погрешностью не более 15-20%).

Разработаны упрощенные аналитические выражения для автоматического управления производительностью сушилки по исходной и максимальной влажности зерна, не требующие задания дополнительных параметров. Сравнивается сигнал, поступающий от влагомеров на входе и выходе сушилки с величинами исходной и конечной влажности зерна и величиной доли теплоты, пошедшей на испарение влаги, заложенными в программу управления. Возможна стабилизация температурного режима сушки путем изменения производительности сушилки в зависимости от изменения температуры нагрева зерна при $W = const$.

Периодическая циркуляция зерна используется в случае превышения текущей влажности над кондиционной и способствует повышению производительности.

Выводы. Эффективность сушилки определяет-

ся паспортной производительностью, отклонением текущего влагосодержания зерна от заданного и отношением долей теплоты, пошедших на испарение и нагрев.

При неизменной исходной влажности эффектив-

ность сушиллки определяется ее паспортной производительностью, максимальной заданной разностью температур зерна, а также отношением долей теплоты на нагрев и испарение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афонькина В.А., Захахатов В.И., Майоров В.И., Попов В.М. К вопросу управления процессом комбинированной сушки зерна // *Вестник Мордовского университета*. Т. 26. 2016. С. 32-39.
2. Штейнберг Ш.Е., Хвилевичкий Л.О., Ястребенецкий М.А. Промышленные автоматические регуляторы. М.: Энергия. 1973. 568 с.
3. Industrial programmable controller systems IPC-300 (США). 1985.
4. Гуляев Г.А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна. М.: Агропромиздат. 1990. С. 68-71.
5. Анискин В.И., Рыбарук В.А. Теория и технология сушки и временной консервации зерна активным вентилированием. М.: Колос. 1972. 200 с.
6. Секанов Ю.П., Елизаров В.П., Левина Н.С. Регули-
- рование влажности зерна по косвенному параметру // *Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства*. 1972. N5. С. 24-26.
7. Гуляев Г.А. Оптимизация управления шахтной зерносушилкой // *НТБ «ВИМ»*. 1986. Вып. 63. С. 21-25.
8. 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). pp. 15-26.
9. Воронов А.А., Кондратьев Г.А., Чистяков Ю.В. Теоретические основы построения автоматизированных систем управления. М.: Наука. 1977. 231 с.
10. Краусп В.Р. Автоматизация послеуборочной обработки зерна. М.: Машгиз. 1975. 277 с.
11. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия. 1984. 320 с.

REFERENCES

1. Afon'kina V.A., Zakhakhatov V.I., Mayorov V.I., Popov V.M. K voprosu upravleniya kombinirovannoy sushki zerna [On the issue of controlling combined grain drying] // *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2016. Vol. 26: 32-39. (In Russian).
2. Steinberg Sh.E., Khvilevetskiy L.O., Yastrebenetskiy M.A. Promyshlennyye avtomaticheskiye regulatory [Industrial automatic controllers]. Moscow: Energiya, 1973. 568. (In Russian).
3. Industrial programmable controller systems IPC-300 (USA). 1985. (In English).
4. Gulyayev G.A. Avtomatizatsii protsessov posleuborochnoy obrabotki i khraneniya zerna. [Automation of post-harvest processing and storage of grain] Moscow: VO "Agropromizdat", 1990. 68-71. (In Russian).
5. Aniskin V.I., Rybaruk V.A. Teoriya i tekhnologiya sushki i vremennoy konservatsii zerna aktivnym ventilirovaniyem [Theory and technology of drying and temporary preservation of grain by active ventilation]. Moscow: Kolos. 1972. 200. (In Russian).
6. Sekanov Yu.P., Elizarov V.P., Levina N.S. Regulirovaniye vlazhnosti zerna po kosvennomu parametru [Regulation of grain moisture by an indirect parameter] // *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sotsialisticheskogo sel'skogo khozyaystva*. 1972; 5: 24-26. (In Russian).
7. Gulyayev G.A. Optimizatsiya upravleniya shakhtnoy zernosushilkoj [Optimization of the management of mining dryer] // *NTB «VIM»*. 1986. Iss. 63: 21-25. (In Russian).
8. 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. (In English).
9. Voronov A.A., Kondrat'yev G.A., Chistyakov Yu.V. Teoreticheskiye osnovy postroyeniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya [Theoretical bases of designing automated control systems]. Moscow: Nauka. 1977; 231. (In Russian).
10. Krausp V.R. Avtomatizatsiya posleuborochnoy obrabotki zerna [Post-harvest grain processing automation]. Moscow: Mashgiz, 1975; 277. (In Russian).
11. Sazhin B.S. Osnovy tekhniki sushki [Basics of drying techniques]. Moscow: Khimiya. 1984; 79. (In Russian).

Статья поступила в редакцию 13.03.2018
The paper was submitted
to the Editorial Office on 13.03.2018

Статья принята к публикации 25.07.2018
The paper was accepted
for publication on 25.07.2018

Конфликт интересов.
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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