

6. Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента: учеб. пособие / Н.Ц. Гапанова, А.Н. Колиух, Н.В. Орлова [и др.]. – Тамбов, 2014. – 77 с.
3. Voronezh, 2016. – Ch. I. – S. 260–267.
3. Pat. № 2478446 RF, MPK V07V 1/46. Konusnyj klassifikator / G.N. Vahnina, F.V. Posharnikov, E.V. Kondrashova, R.G. Borovikov; zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «VGLTA». – № 2011140912/06; zajavl. 07.10.2011; opubl. 10.04.2013, Bjul. № 10. – 4 s.
1. Gorelov M.V., Bastron T.N., Mal'chik R.V. Obzor tehnologicheskikh kompleksov sushki shishek i izvlechenija semjan hvojnyh porod derev'ev // Vestn. KrasGAU. – 2017. – № 3 (126). – S. 79–85.
4. Evchenko A.V. Analiz fiziko-mehanicheskikh svojstv semjan zernovyh kul'tur // Vestn. KrasGAU. – 2016. – № 8 (119). – S. 144–149.
2. Soderzhatel'noe opisanie funkcional'noj modeli resursosberegajushhej tehnologii s napravlennym dvizheniem chastic / G.N. Vahnina, E.L. Shadrina, A.S. Gulevskij [i dr.] // Sovremennye nauchno-prakticheskie reshenija XXI veka: mat-ly mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Voronezh, 21–22 dekabrja 2015 g.). –
5. Brichagina A.A., Il'in S.N., Pal'vinskij V.V. Modelirovanie tehnologicheskogo processa vysevajushhego apparata zernovoj sejalki // Vestn. KrasGAU. – 2016. – № 11 (122). – S. 67–71.
6. Osnovy teorii i tehniki fizicheskogo modelirovanija i jeksperimenta: ucheb. posobie / N.C. Gatapova, A.N. Koliuh, N.V. Orlova [i dr.]. – Tambov, 2014. – 77 s.

#### Literatura

УДК 631.365.32

**В.Г. Захахатнов, В.К. Дыленя,  
П.В. Кашин**

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫГРУЗНОГО УСТРОЙСТВА ЗЕРНОСУШИЛКИ

**V.G. Zakhakhatnov, V.K. Dylenya,  
P.V. Kashin**

#### THE RESEARCH ON FLOW CHARACTERISTICS OF DISCHARGER UNIT OF GRAIN DRYER

**Захахатнов В.Г.** – канд. техн. наук, доц. каф. энергообеспечения и автоматизации технологических процессов Южно-Уральского государственного аграрного университета, г. Челябинск. E-mail: zahvg@inbox.ru

**Дыленя В.К.** – магистрант каф. энергообеспечения и автоматизации технологических процессов Южно-Уральского государственного аграрного университета, г. Челябинск. E-mail: dello\_2010@mail.ru

**Кашин П.В.** – магистрант каф. энергообеспечения и автоматизации технологических процессов Южно-Уральского государственного аграрного университета, г. Челябинск. E-mail: george-ju@yandex.ru

**Zakhakhatnov V.G.** – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Power Supply and Automation of Technological Processes, Southern Ural State Agrarian University, Chelyabinsk. E-mail: zahvg@inbox.ru

**Dylenya V.K.** – Magistrate Student, Chair of Power Supply and Automation of Technological Processes, Southern Ural State Agrarian University, Chelyabinsk. E-mail: delloyo\_2010@mail.ru

**Kashin P.V.** – Magistrate Student, Chair of Power Supply and Automation of Technological Processes, Southern Ural State Agrarian University, Chelyabinsk. E-mail: george-ju@yandex.ru

Управление процессом сушки зерна в зерносушилках предполагает регулирование количества тепла, подводимого к зерну в сушильной камере, которое зависит от его влажности, температуры и стадии сушки. При непрерывной работе сушилки наиболее технически просто регулирование осуществлять за счет изменения скорости выгрузки зерна из сушильной камеры, для этого необходимо знать расходную характеристику выгрузного устройства. Цель исследования – получение математической модели зависимости расхода

зерна выгрузного устройства зерносушилки от его конструктивных параметров и режимов работы. Задачи: создание экспериментальной установки выгрузного устройства зерносушилки и исследование его расходной характеристики методами планирования эксперимента. Эксперименты проводились с зерном пшеницы на экспериментальной установке, моделирующей выгрузное устройство шахтных и колонковых сушилок. Экспериментальная установка включает бункер, выпускное отверстие которого перекрывает по-

движная пластина, приводимая в возвратно-поступательное движение электродвигателем с редуктором. Частотой вращения двигателя управляет частотный преобразователь. За параметры, влияющие на производительность выгрузного устройства, приняты зазор между кромкой выпускного отверстия бункера и перекрывающей пластиной, частота колебаний перекрывающей пластины и влажность зерна. Искомая модель получена в результате реализации полного факторного плана <sup>23</sup>. Анализ полученной зависимости позволяет заключить, что наиболее сильное влияние на производительность выгрузного устройства оказывают частота колебания перекрывающей пластины и влажность зерна. Зазор между кромкой бункера и перекрывающей пластиной влияет на производительность не значительно, поэтому регулирование расхода зерна через выгрузное устройство за счет изменения зазора не рационально; технически проще и эффективнее регулирование расхода за счет изменения частоты колебания перекрывающей пластины.

**Ключевые слова:** сушка, выгрузное устройство, математическая модель, планирование эксперимента.

*The control of grain drying process in grain dryers presumes the regulation of quantity of heat supplied to grain in drying chamber, which depends on moisture, temperature and the stage of grain drying. In the case of a dryer's continuous running it is technically more simple to regulate the quantity of heat with the help of speed change of discharge of grain from drying chamber, for this it is necessary to know the flow characteristics of a discharge unit. The aim of the research is to get mathematical model of dependence of flow rate of grain for a discharge unit of grain dryer on its design parameters and modes of operation. The research objectives are the creation of experimental facility of discharge unit of grain dryer and study of its flow characteristics by the methods of experimental design. The experiments were made with wheat grains on the experimental facility, simulating a discharge unit of shaft and tower driers. Experimental installation turns on the bunker which outlet is blocked by the mobile plate set in back and forth motion by electric motor with a reducer. The frequency of rotation of the engine is controlled by frequency converter. As the parameters influencing the efficiency of discharge unit the clearance between the edge of outlet of the bin and the movable plate, oscillation frequency of the covering plate and moisture of grain are accepted. Required model is the result of realization of complete factorial design <sup>23</sup>. The analysis of received depend-*

*ence allows to conclude that the frequency of fluctuation of blocking plate and humidity of grain have the strongest impact on productivity of unloading device. The impact of the clearance between the edge of the bin and covering plate is not significant, so the regulation of flow rate of grain through discharge unit by the way of changing clearance is not rational, from technical point of view it is simpler and more effective to regulate the flow rate by changing oscillation frequency of covering plate.*

**Keywords:** drying, discharge unit, mathematical model, experimental design.

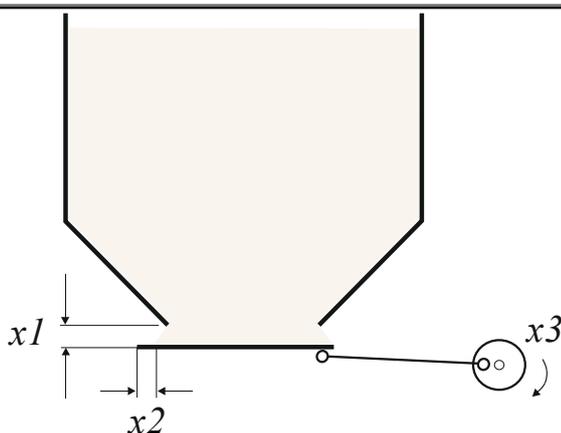
**Введение.** Управление процессом сушки зерна в зерносушилке заключается в регулировании количества тепла, подводимого к зерну, в зависимости от его влажности, температуры и стадии сушки. Сложность заключается в том, что высушиваемый материал в процессе сушки изменяет свои теплофизические свойства. Сушильная камера как объект управления в процессе сушки меняет свою передаточную функцию, что при значительных ее объемах затрудняет создание эффективной системы автоматического управления. В работах Н.М. Андрианова, С.К. Манасяна предлагается сушильную камеру рассматривать как несколько зон со своими передаточными функциями и как многосвязную систему. При таком подходе нужно регулировать количество тепла, подводимого в каждую из зон. Количество тепла можно регулировать за счет изменения скорости и температуры теплоносителя, а также за счет изменения экспозиции сушки [1, 2]. Последнее может осуществляться путем регулирования скорости выгрузки зерна из зоны сушки. Для разработки алгоритма управления выгрузным устройством необходимо знать его расходную характеристику, которая зависит от его конструктивных параметров и режимов работы.

**Цель исследования.** Получить математическую модель зависимости производительности выгрузного устройства зерносушилки от его конструктивных параметров и режимов работы.

**Задачи исследования:** создать экспериментальную установку и провести исследования по методике планирования эксперимента.

**Материалы и методы исследования.** Исследования проводились на пшенице по методике планирования экспериментов.

Существует достаточно много конструкций выгрузных устройств [2–3], однако большинство эксплуатируемых в настоящее время шахтных и колонковых сушилок имеют конструкцию выгрузного устройства, принцип работы которого показан на рисунке.



Принцип работы выгрузного устройства зерносушилки

Выпускное отверстие сушильной камеры перекрывает пластина, закрепленная на подвижной раме (на рисунке не показана), которая приводится в движение эксцентриковым механизмом и совершает колебательные движения в горизонтальной плоскости с определенной амплитудой. Между перекрывающей пластиной и краями выпускного отверстия имеется зазор, через который при каждом колебании высыпается определенная порция зерна. Очевидно, что количество зерна, выгружаемого из сушилки в единицу времени, зависит от частоты колебания перекрывающей пластины, зазора между пластиной и краями выпускного отверстия, а также от влажности выгружаемого зерна, которая может колебаться в широких пределах. Так, в начале сушки, когда сушилка работает в рециркуляционном режиме «сама

на себя», влажность выгружаемого зерна может достигать 30 %, а при выгрузке высушенного зерна (для пшеницы) влажность составляет 12–15 %.

Для исследования расходной характеристики была построена экспериментальная установка. В качестве привода перекрывающей пластины использован червячный редуктор. Для изменения частоты вращения электродвигателя использовался частотный преобразователь HYUNDAI N700E. Ширина выпускного отверстия составляла 200 мм.

Исследования проводились с использованием методики планирования эксперимента. В качестве варьируемых факторов были приняты частота колебания перекрывающей пластины  $x_1$ , зазор  $x_2$  и влажность зерна  $x_3$ . Интервалы варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Частота колебания $x_1$ , 1/мин	Зазор $x_2$ , мм	Влажность $x_3$ , %
20–52	15–25	15–30
Кодированные значения факторов		
-1 +1	-1 +1	-1 +1

Априори было сделано предположение, что зависимость количества выгружаемого зерна в единицу времени от влияющих факторов линейна. Поэтому варьирование факторов может быть принято на двух уровнях. По этим причинам был выбран план

полного факторного эксперимента  $2^3$ , реализация которого предполагает проведение восьми экспериментов. Матрица плана приведена в таблице 2.

Таблица 2

Номер эксперимента	$x_1$	$x_2$	$x_3$	у, г			$\bar{y}$
1	-1	-1	+1	338	335	319	330.7
2	-1	+1	-1	915	934	965	938
3	+1	-1	-1	1688	1609	1603	1633
4	+1	+1	+1	1322	1317	1272	1304
5	-1	-1	-1	586	588	562	578.7
6	-1	+1	+1	513	491	562	503.7
7	+1	-1	+1	782	809	816	802.3
8	+1	+1	-1	2239	2275	2271	2262

Реализация такого плана позволяет получить модель, описывающую зависимость массового расхода зерна у выгрузного устройства от трех факторов  $x_1, x_2, x_3$ , упомянутых выше

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (1)$$

Для статистического анализа полученных данных опыт проводился в среде Mathcad. Рассчитывалась дисперсия повторных опытов по формуле [5]

$$s_i^2 = \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n-1}.$$

Здесь  $n = 3$  – число опытов в каждой строке плана (повторностей);  $\bar{y}_i$  – среднее значение отклика в трех повторностях.

Для исключения грубых ошибок для каждой строки плана вычислялся расчетный  $t$ -критерий Стьюдента по формуле

$$t_{расч} = \frac{y_i - \bar{y}_i}{s_i}.$$

Расчетные критерии сравнивались с табличным значением, равным 4,3, взятым для трех повторностей и доверительной вероятности 0,95. Поскольку ни одно значение расчетного критерия не превысило значение табличного, сделан вывод об отсутствии в рабочей матрице плана грубых ошибок.

Дисперсия воспроизводимости рассчитывалась по формуле

$$s_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_1^N s_i^2}{N}.$$

Здесь  $N = 8$  – число строк в матрице плана. Для проверки однородности дисперсий строк плана рассчитывался критерий Кохрена. Табличное значение критерия Кохрена для степеней свободы  $f_1 = n-1=2$  и  $f_2 = N=8$  равно 0,51.

$$G_{расч} = \frac{s_{max}^2}{\sum_1^N s_i^2} = \frac{2250}{4800} = 0,47.$$

Табличное значение критерия Кохрена  $G_{табл} = 0,81$ . Поскольку расчетное значение критерия меньше табличного, дисперсии однородны.

Вычисления коэффициентов регрессии по нижеприведенным формулам дали следующие результаты:

$$b_0 = \sum_1^N \bar{y}_u ; b_i = \frac{\sum_1^N x_{iu} \bar{y}_u}{N};$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_1^N x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{N}; b_{ijk} = \frac{\sum_1^N x_{iu} x_{ju} x_{ku} \bar{y}_u}{N}.$$

$$b_0=1046; b_1=453,8; b_2=205,3;$$

$$b_3=-306,4; b_{12}=77,1; b_{13}=-140,8;$$

$$b_{23}=-41,6; b_{123}=9,9.$$

После вычисления коэффициентов регрессии проверялась их значимость. Для этого рассчитывался доверительный интервал для коэффициентов регрессии с учетом критерия Стьюдента ( $t=4,3$ ), взятого для трех повторностей и доверительной вероятности 0,95

$$\Delta b_i = \pm \frac{t s_{\{y\}}}{\sqrt{N}} = \pm 37,24.$$

Сравнивая значения коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов, можно заключить, что коэффициент  $b_{123}$  не значим и его можно не включать в уравнение регрессии. С учетом сказанного уравнение регрессии имеет вид

$$\hat{y} = 1046 + 453,8 x_1 + 205,3 x_2 - 306,4 x_3 + 77,1 x_1 x_2 - 140,8 x_1 x_3 - 41,6 x_2 x_3. \quad (2)$$

Для проверки адекватности вычисляем теоретические значения параметра оптимизации  $\bar{y}$ , величину ошибки  $\Delta y = y - \hat{y}$  и дисперсию адекватности

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_1^N \Delta y_i^2}{f_1},$$

где  $f_1 = N - d = 8 - 7 = 1$  – число степеней свободы;  $d = 7$  – число значащих коэффициентов модели.

Для оценки адекватности модели рассчитывался критерий Фишера и сравнивался с табличным значением  $F_{табл} = 4,49$ , взятым для степеней свободы  $f_1=1$  и  $f_2=N(m-1)=16$

$$F_{расч} = \frac{s_{ад}^2}{s_{\{y\}}^2} = 0,321.$$

Модель адекватна. Расчетное значение критерия Фишера получилось меньше единицы, что говорит о том, что соотношение  $F_{табл} \geq F_{расч}$  будет выполняться при любых значениях степеней свободы [4–6].

Анализ уравнения (2) показывает, что на расход зерна наибольшее влияние оказывает частота колебания перекрывающей пластины  $x_1$ . С увеличением влажности  $x_3$  производительность разгрузочного устройства падает, поскольку коэффициент при  $x_3$  со знаком минус. Увеличение зазора  $x_2$  приводит к увеличению производительности, как и одновременное увеличение зазора и частоты колебаний.

**Выводы.** На основании анализа полученной модели можно заключить, что регулирование производительности за счет изменения зазора, которое реализовано в большинстве действующих сушилок, не рационально. Эффективнее оказывается регулирование за счет изменения частоты колебания пере-

крывающих пластин, что может быть достигнуто использованием частотного преобразователя для управления электродвигателем разгрузочного устройства [7].

Для оптимизации конструкции выгрузного устройства сушилки необходимо исследовать влияние ширины выпускного отверстия на его производительность.

Для использования полученной зависимости (2) в системе автоматического управления сушилкой в каждом конкретном случае необходимо получить зависимость расхода зерна от управляющего сигнала частотного преобразователя.

### Литература

1. Цугленок Н.В., Манасян С.К., Цугленок В.Н. [и др.]. Обоснование автоматизированной системы многосвязного управления процессом сушки зерна // Вестн. КрасГАУ. – 2010. – № 10. – С. 160–165.
2. Патент РФ № 2 199 707. Способ регулирования процесса сушки зерна и выгрузное устройство зерносушилки для его осуществления / Андрианов Н.М., Папин А.А., Соловьев А.М., Андрианов Д.Н. – Оpubл. 27.02.2003, Бюл. № 6. – 5 с.
3. Жидко В.И., Резчиков В.Л., Уколов В.С. Зерносушение и зерносушилки. – М.: Колос, 1982. – 239 с.
4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
5. Барабашук В.И., Креденберг Б.И., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике / под ред. Б.И. Креденберг. – Киев: Техника, 1984. – 200 с.

6. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
7. Гуляев Г.А. Об автоматизации управления электроприводами зернопунктов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1973. – № 11. – С. 7–10.

### Literatura

1. Cuglenok N.V., Manasjan S.K., Cuglenok V.N. [i dr.]. Obosnovanie avtomatizirovannoj sistemy mnogovsvjaznogo upravlenija processom sushki zerna // Vestn. KrasGAU. – 2010. – № 10. – S. 160–165.
2. Patent RF № 2 199 707. Sposob regulirovanija processa sushki zerna i vygruznoe ustrojstvo zernosushilki dlja ego osushhestvlenija / Andrianov N.M., Papin A.A., Solov'ev A.M., Andrianov D.N. – Opubl. 27.02.2003, Bjul. № 6. – 5 s.
3. Zhidko V.I., Rezchikov V.L., Ukolov V.S. Zerno-sushenie i zernosushilki. – M.: Kolos, 1982. – 239 s.
4. Adler Ju.P., Markova E.V., Granovskij Ju.V. Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij. – M.: Nauka, 1976. – 280 s.
5. Barabashhuk V.I., Kredenberg B.I., Miroshnichenko V.I. Planirovanie jeksperimenta v tehnike / pod red. B.I. Kredenberg. – Kiev: Tehnika, 1984. – 200 s.
6. Planirovanie jeksperimenta v issledovanii tehnologicheskikh processov / pod red. Je.K. Leckogo. – M.: Mir, 1977. – 552 s.
7. Guljaev G.A. Ob avtomatizacii upravlenija jelektroprivodami zernopunktov // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 1973. – № 11. – S. 7–10.