

К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОМБИНИРОВАННОЙ СУШКИ ЗЕРНА**В. А. Афонькина¹, В. Г. Захахатнов¹, В. И. Майоров²,
В. М. Попов¹**¹*ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (г. Челябинск, Россия)*²*ФГБОУ ВО «Тюменский государственный университет» (г. Тюмень, Россия)*

Значительная доля зерна, производимого в регионе Южного Урала, имеет повышенную влажность и нуждается перед закладкой на хранение в сушке. Сушка является энергоемким процессом и составляет около 70 % от общего объема энергозатрат на послеуборочную обработку зерна. Современное зерносушильное оборудование, реализующее высокотемпературную конвективную сушку, обеспечивает затраты теплоты 5 350–5 500 кДж на 1 кг испаренной влаги, что значительно превышает предварительные расчеты. Комбинированная сушка, которая предполагает сочетание стадий высокотемпературной сушки и активного вентилирования зерна, позволяет снизить затраты теплоты до 30 %. Для управления процессом данной сушки необходимо иметь связь конечной влажности зерна с такими параметрами высокотемпературной сушки и активного вентилирования как начальная влажность, температура нагрева зерна и время последующего активного вентилирования. В данной статье такая связь в виде математической модели второго порядка экспериментально была получена для пшеницы (в результате реализации плана Бокса-Бенкина для трех факторов – начальной влажности, температуры нагрева зерна и времени его вентилирования). Эксперимент проводился для неподвижного слоя зерна толщиной 200 мм. Также была получена модель, связывающая энергозатраты с вышеупомянутыми параметрами. Модель для конечной влажности в пределах варьирования факторов может быть использована для создания алгоритма управления комбинированной сушкой. Имея в качестве заданных параметров конечную влажность, начальную влажность и температуру нагрева зерна, микроконтроллер вычисляет время активного вентилирования, необходимое для получения конечной влажности, после чего выгрузной механизм обеспечивает его за счет регулирования скорости выгрузки. Модель энергозатрат дает возможность рассчитать затраты тепловой энергии на сушку при различных значениях исходной влажности, температуры нагрева зерна и времени активного вентилирования.

Ключевые слова: комбинированная сушка, влажность, эксперимент, модель, управление

Для цитирования: К вопросу управления процессом комбинированной сушки зерна / В. А. Афонькина [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26, № 1. С. 32–39. doi: 10.15507/0236-2910.026.201601.032-039



ON THE QUESTION OF PROCESS CONTROL COMBINED GRAIN DRYING

V. A. Afonkina^a, V. G. Zakhakhatnov^a, V. I. Mayerov^b,
V. M. Popov^a

^aSouth Ural State Agrarian University (Chelyabinsk, Russia)

^bTyumen State University (Tyumen, Russia)

A large part of the grain produced in the South Urals has high humidity and needs to be dried before storage. Drying is an energy-intensive process and is about 70 % of the total energy consumption for post-harvest processing of grain. Modern grain drying equipment, implements high-convection drying, and heat provides cost 5 350–5 500 kJ per 1 kg of evaporated moisture, which is well above the theoretical calculations. Combined drying, which involves high-temperature drying step and aeration enables to reduce heat costs up to 30 %. To control the combined drying process it is necessary that final grain moisture relates to such parameters of high-temperature drying and aeration as the initial moisture content, the temperature of grain and the time subsequent aering. The paper describes the said relation as a mathematical model of the second order obtained experimentally for wheat. The model has been derived from the implementation of Box-Benkin plan for three factors – the initial grain moisture, temperature and time of grain heating and aering. The experiment was conducted for a 200 mm thick fixed grain bed. We also have got a model relating energy consumption to the said parameters. The model of the final grain moisture within the variation of factors can be used to create a control algorithm for combined drying. Taking as the set parameters final moisture, initial moisture and grain heating temperature, a microcontroller calculates the time for active aering necessary to obtain final grain moisture and an unloading mechanism provides the necessary time through regulating the discharge rate. The model makes it possible to calculate the energy usage for drying at different values of initial moisture, temperature and time of grain heating and aering.

Keywords: combined drying, moisture content, experiment, model, management

For citation: Afonkina VA, Zakhakhatnov VG, Mayerov VI, Popov VM. On the question of process control combined grain drying. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2016; 1(26):32-39. doi: 10.15507/0236-2910.026.201601.032-039

В силу климатических условий Южный Урал входит в зону рискованного земледелия, о чем свидетельствует ситуация, сложившаяся, например, в 2014 г. (часть зерновых культур пришлось убирать при наличии снежного покрова). Почти все зерно, выращиваемое в данном регионе, нуждается в сушке, которая является достаточно энергоемким процессом и, по некоторым оценкам, занимает до 70 % от общего объема энергозатрат на послеуборочную обработку зерна, что значительно увеличивает его себестоимость.

Очевидно, что для снижения себестоимости послеуборочной обработки зерна необходимо повышать коэффи-

циент полезного действия (КПД) зерносушильного оборудования. Как отмечают ряд авторов, даже самые современные устройства ведущих мировых производителей имеют низкий КПД: затраты теплоты на испарение 1 кг влаги в них составляют 5 350–5 500 кДж, что в 7–8 раз превышает аналогичный показатель в т. н. «идеальной сушилке». В настоящее время наиболее распространенным является конвективный высокотемпературный способ сушки. Различные меры по снижению энергозатрат повышают стоимость сушильного оборудования, не приводя к значительному увеличению КПД. Снижение энергозатрат в рассматри-

ваемом процессе до 30 % может быть достигнуто при комбинированном способе сушки [1–2], когда зерно, нагретое в процессе высокотемпературной сушки доводится до кондиционной влажности через стадию квазиизотермического активного вентилирования при низкой скорости воздуха.

Исследования, проведенные для процесса высокотемпературной сушки в шахтной сушилке, показывают, что сушилка представляет собой сложный многосвязный объект с распределенными параметрами, который описывается несколькими передаточными функциями. Основным возмущающим фактором для данного процесса является колебание влажности зерна, а регулирующим – количество тепла, подводимое к зерну в процессе сушки, которое обуславливает температуру его нагрева [3–4]. Удельные свойства зерна непрерывно изменяются в процессе сушки, что приводит к необходимости разделять сушилку на соответствующие зоны и осуществлять позонное регулирование с введением обратных связей для каждого контура [5].

При проведении подобных исследований предполагается, что процесс управления сушкой заключается в регулировании температуры зерна посредством изменения температуры теплоносителя, а также времени нахождения зерна в зоне нагрева. При этом окончанием сушки является достижение зерном заданной влажности. В случае комбинированной сушки высокотемпературная стадия должна соответствовать этапу максимальной скорости обезвоживания и обеспечить снятие химически не связанной влаги [6]. Очевидно, что параметры высокотемпературного этапа обуславливают параметры стадии активного вентилирования. По этой причине для управления комбинированной сушкой необходимо рассматривать обе группы в рамках одного процесса. В связи с этим определенным интерес пред-

ставляет получение математической модели, связывающей характеристики высокотемпературной сушки и последующего активного вентилирования, в частности, начальной влажности и температуры нагрева зерна. Такая модель, а также модель, устанавливающая зависимость энергозатрат от вышеперечисленных технологических параметров, были получены по методике планирования эксперимента.

Поскольку известно, что скорость сушки зерна носит нелинейный характер [7], было принято решение об использовании модели второго порядка. В ходе эксперимента необходимо варьировать влажность зерна, что вызывает определенные трудности. В целях их преодоления был выбран план Бокса-Бенкина, достоинством которого, кроме возможности минимизации количества экспериментов, является допустимость варьирования факторов только на 3 уровнях.

Экспериментальная установка представляла собой термоизолированный цилиндр с внутренним диаметром 80 мм, через который подавался нагретый воздух (его температура автоматически поддерживалась с помощью нагревателя и регулятора «ТРМ1»). Температура отработанного теплоносителя, наружного воздуха и образца зерна, усредняемого по 3 точкам, измерялась с помощью прибора «УКТ136»; влажность отработанного теплоносителя и наружного воздуха – прибором «ДТ-625»; влажность зерна – с помощью «Фауна-М». Исследования проводились для неподвижного слоя зерна толщиной 200 мм и скорости теплоносителя 0,6 м/с. Данные величины были выбраны в ходе предварительных экспериментов [8–9] из условия получения приемлемых градиентов температуры (3 °С в установившемся режиме) и влажности (не более 2 %) в слое. Поскольку эксперимент производился с неподвижным слоем зерна, температура теплоносителя составля-



ла 60 °С. Температура нагрева зерна при этом не превышала допустимого значения 55 °С.

С целью минимизации потери тепла, полученного в период нагрева, активное вентилирование осуществлялось наружным воздухом с периодичностью 5 мин и скважностью 0,05. Такое соотношение было выбрано на основе предварительных экспериментов из соображений своевременного удаления влаги из зерна при его минимальном охлаждении: было установлено, что за время паузы влажность в межзерновом пространстве увеличивается до 80 %, а время вентилирова-

ния является достаточным для ее снижения до 20–30 % [Там же].

Для получения модели был реализован план Бокса-Бенкина для 3 факторов: относительной начальной влажности зерна $X1$, конечной температуры зерна в стадии нагрева $X2$ и времени активного вентилирования $X3$. В качестве отклика регистрировалась конечная влажность зерна Y и энергозатраты y . Диапазоны варьирования факторов приведены в табл. 1.

Матрица планирования и значения полученного отклика приведены в табл. 2.

Таблица 1

Table 1

Интервалы варьирования факторов
Intervals of variation factors

Факторы / Factors	W – начальная относительная влажность зерна $X1$ / Initial relative grain humidity $X1$	T , °С – конечная температура нагрева зерна $X2$ / Final grain temperature $X2$	T , мин – время активного вентилирования $X3$ / Period of active venting $X3$
Интервал варьирования / Interval of variation	0,150...0,215...0,280	30...40...50	30,0...45,5...60,0
Кодированные значения факторов / Coded values of factors	-1 0 +1	-1 0 +1	-1 0 +1

Здесь Y, Y' – экспериментальные и расчетные результаты конечной влажности в относительных единицах соответственно; y, y' – экспериментальные и расчетные энергозатраты $\frac{\text{кВт} \times \text{час}}{\text{кг}}$.

Обработка экспериментальных данных велась по методике, изложенной

в [10]; коэффициенты регрессии рассчитывались методом наименьших квадратов в программе «Mathcad» с применением методики матричной алгебры. В результате расчетов и статистического анализа были получены уравнения регрессии для конечной влажности (1) и энергозатрат на сушку (2).

$$Y = 0,175 + 0,045 * X1 - 0,021 * X2 - 2,41 * 10^{-3} * X3 + 0,01 * X1^2; \quad (1)$$

$$y' = 0,777 - 0,022X1 + 0,12X1 \times X2 - 0,125X1 \times X3 + 0,121X2 \times X3 + 0,25X3^2. \quad (2)$$



Таблица 2
Table 2

Матрица планирования эксперимента. План Бокса-Бенкина для 3 факторов
Matrix experiment planning. Box-Benkin plan for 3 factors

№	X0	X1	X2	X3	X1*X2	X1*X3	X2*X3	X1 ²	X2 ²	X3 ²	Влажность / Humidity		Энергозатраты / Energy consumption	
											Y	Y'	y	y'
1	1	+	+	0	1	0	0	1	1	0	0,180	0,192	0,76	0,68
2	1	+	-	0	-1	0	0	1	1	0	0,244	0,234	0,37	0,44
3	1	-	+	0	-1	0	0	1	1	0	0,115	0,102	0,94	0,88
4	1	-	-	0	1	0	0	1	1	0	0,137	0,144	1,03	1,12
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,154	0,157	0,71	0,78
6	1	+	0	+	0	1	0	1	0	1	0,218	0,211	0,80	0,68
7	1	+	0	-	0	-1	0	1	0	1	0,213	0,215	0,94	0,93
8	1	-	0	+	0	-1	0	1	0	1	0,124	0,121	1,51	1,37
9	1	-	0	-	0	1	0	1	0	1	0,122	0,125	1,15	1,12
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,159	0,157	0,78	0,78
11	1	0	+	+	0	0	0	0	1	1	0,129	0,134	1,21	1,15
12	1	0	+	-	0	0	0	0	1	1	0,148	0,138	0,87	0,91
13	1	0	-	+	0	0	0	0	1	1	0,178	0,176	0,79	0,91
14	1	0	-	-	0	0	0	0	1	1	0,185	0,180	0,93	1,15
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,158	0,157	0,83	0,78



Как следует из уравнения (1), наибольшее влияние на конечную влажность оказывает начальная влажность зерна, что согласуется с выводами [2]. Наличие фактора XI^2 свидетельствует о нелинейном характере такого влияния.

Уравнение (2) позволяет рассчитать энергозатраты на сушку при различных значениях начальной влажности, температуре нагрева зерна и времени вентилирования.

Выводы

Исследования технологии комбинированной сушки пшеницы позволили получить зависимость (1), устанавливающую связь между параметрами высокотемпературной сушки – начальной влажностью, температурой нагрева зерна и временем последующего вентилирования.

Полученная зависимость дает возможность в пределах варьирования факторов построить алгоритм управления процессом сушки для микропроцес-

сорной системы. Для этого достаточно ввести в уравнение (1) начальную и конечную влажность зерна и температуру нагрева, после чего вычислить время активного вентилирования. Конечная влажность, необходимая для закладки на хранение, и допустимая температура нагрева, известна для каждой культуры и может быть введена в алгоритм управления вручную. Начальную влажность рекомендуется измерять в автоматическом режиме на входе в сушилку. Время активного вентилирования также рассчитывается автоматически и обеспечивается соответствующим управлением выгрузным механизмом.

Полученные зависимости (1–2) нуждаются в уточнении для каждой конкретной конструкции сушилки, поскольку были получены для неподвижного слоя зерна. Однако проделанная работа демонстрирует методику, по которой такие модели могут быть получены без затруднений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Подгородецкий О. А. К вопросу снижения энергозатрат в технологии двухстадийной сушки // Хранение и переработка зерна. 2013. № 6. С. 35–37. URL: <http://www.agroserver.ru/articles/1147.htm>.
2. Сорочинский В. Ф. Эффективный способ двухстадийной сушки зерна // Комбикормовая промышленность. 1996. № 4. С. 17–18. URL: <http://www.kombi-korma.ru/index.htm>.
3. Регулирование тепловых режимов в сушилках с гравитационным движущимся слоем / Н. М. Андрианов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 4. С. 30–33. URL: <http://www.tismash.ru/archives/12365>.
4. Андрианов Н. М. Исследование шахтной зерносушилки как объекта управления // Успехи современного естествознания. 2004. № 9. С. 86–91. URL: http://www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=7781099.
5. Автоматизация технологического процесса сушки зерна / С. К. Манасян [и др.] // Вестник Краснояр. гос. аграр. ун-та. 2011. № 1. С. 149–152. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-tehnologicheskogo-protsesta-sushki-zerna>.
6. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / В. Мальтри [и др.] ; сокр. пер. с нем. ; под ред. В. Г. Евдокимова. М. : Машиностроение, 1979. 525 с. URL: <http://www.prosushka.ru/189-sushilnye-ustanovki-selskoxozyajstvennogo.html>.
7. Малин Н. И. Энергосберегающая сушка зерна. М. : Колос, 2004. 240 с. URL: http://hipzmag.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=258:258&Itemid=16.
8. Захахатнов В. Г., Попов В. М. Результаты эксперимента по оптимизации энергозатрат на сушку рапса // Мат-лы III Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. П. Г. Свечникова. Челябинск : ЧГАА, 2014. Ч. III. С. 346–351. URL: <http://www.csa.ru/sci/conf/csa-conf/item/conf-liv-3.html>.



9. Захатнов В. Г., Котельников С. Ю., Сычев П. А. Модель управления сушкой зерна комбинированным методом // Вестник ЧГАА. 2014. Т. 68. С. 35–38. URL: <http://www.csaa.ru/sci/vestnik/vest-archive/item/vestnik68.html>.

10. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М. : Машиностроение, 1981. 184 с. URL: <http://lib-bkm.ru/load/94-1-0-2233>.

Поступила 27.10.2015 г.

Об авторах:

Афонькина Валентина Александровна, старший преподаватель кафедры электротехники и автоматики Института агроинженерии ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 75), доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9743-5278>, AfVa82@mail.ru

Захатнов Виктор Глебович, доцент кафедры электротехники и автоматики Института агроинженерии ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 75), кандидат технических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2856-9755>, zahvg@inbox.ru

Майоров Владимир Иванович, профессор кафедры административного и финансового права Института государства и права ФГБОУ ВО «Тюменский государственный университет» (Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6490-3546>, 1955715@rambler.ru

Попов Виталий Матвеевич, профессор электротехники и автоматики Института агроинженерии ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 75), доктор технических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5773-4839>, ntc-es@mail.ru

REFERENCES

1. Podgorodetskiy OA. K voprosu snizheniya energozatrat v tekhnologii dvukhstadiynoy sushki [On the question of reducing energy consumption in two-stage drying technology]. *Khraneniye i pererabotka zerna* = Grain storage and processing. 2013; 6:35-37. Available from: <http://www.agroserver.ru/articles/1147.htm>. (In Russ.)

2. Sorochinskiy VF. Effektivnyy sposob dvukhstadiynoy sushki zerna [Effective method of two-stage drying grain]. *Kombikormovaya promyshlennost* = Compound feed industry. 1996; 4:17-18. Available from: <http://www.kombi-korma.ru/index.htm>. (In Russ.)

3. Andrianov NM, et al. Regulirovaniye teplovykh rezhimov v sushilkakh s gravitatsionnym dvizhushchimsya sloyem [Regulation of thermal conditions in the dryer with the gravitational moving bed]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and agricultural machinery. 2014; 4:30-33. Available from: <http://www.tismash.ru/archives/12365>. (In Russ.)

4. Andrianov NM. Issledovaniye shakhtnoy zernosushilki kak obyekt upravleniya [Research of shaft dryer as a control object]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* = Advances in current natural sciences. 2004; 9:86-91. Available from: http://www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=7781099. (In Russ.)

5. Manasyan SK, et al. Avtomatizatsiya tekhnologicheskogo protsessa sushki zerna [Automation of grain drying]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Krasnoyarsk State Agrarian University Bulletin. 2011; 1:149-152. Available from: <http://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-tehnologicheskogo-protsessa-sushki-zerna>. (In Russ.)

6. Maltri V, et al. Sushilnyye ustanovki selskokhozyaystvennogo naznacheniya [Dryers for agricultural purposes]. Translated from German. Moscow: Mashinostroyeniye; 1979. Available from: <http://www.prosushka.ru/189-sushilnye-ustanovki-selskoxozyajstvennogo.html>. (In Russ.)

7. Malin NI. Energoberegayushchaya sushka zerna [Energy-efficient drying grain]. Moscow: Kolos; 2004. Available from: http://hipzmag.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=258:258&Itemid=16. (In Russ.)



8. Zakhakhatnov VG, Popov VM. Rezultaty eksperimenta po optimizatsii energozatrat na sushku rapsa [Experimental results for optimization of energy consumption for drying rape]. In: Svechnikova PG, editor. *Materialy LVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Dostizheniya nauki – agropromyshlennomu proizvodstvu"* = Conference proceedings "Advances in science for agricultural production". Chelyabinsk: CGAA Publ; 2014. Part III. p. 346-351. Available from: <http://www.csaa.ru/sci/conf/csaa-conf/item/conf-liv-3.html>. (In Russ.)

9. Zakhakhatnov VG, Kotelnikov SYu, Sychev PA. Model upravleniya sushkoy zerna kombinirovannym metodom [The model to control grain drying by the combined method]. *Vestnik CGAA* = CGAA Bulletin. 2014; 68:35-38. Available from: <http://www.csaa.ru/sci/vestnik/vest-archive/item/vestnik68.html>. (In Russ.)

10. Spiridonov A. Planirovaniye eksperimenta pri isslyedovanii tekhnologicheskikh protsessov [Planning experiment in technological processes]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1981. Available from: <http://lib-bkm.ru/load/94-1-0-2233>. (In Russ.)

Submitted 27.10.2015

About the authors:

Valentina Afonkina, senior lecturer of Electrical Engineering and Automation chair, Institute of Agricultural Engineers, South Ural State Agricultural University (75, Lenin Prospekt, Chelyabinsk, Russia), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9743-5278>, AfVa82@mail.ru

Viktor Zakhakhatnov, associate professor of Electrical Engineering and Automation chair, Institute of Agricultural Engineers, South Ural State Agricultural University (75, Lenin Prospekt, Chelyabinsk, Russia), Ph.D. (Engineering), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2856-9755>, zahvg@inbox.ru

Vladimir Mayerov, professor of Administrative and Financial Law, Institute of State and Law, Tyumen State University (6, Volodarskiy Str., Tyumen, Russia), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-6490-3546>, 1955715@rambler.ru

Vitaliy Popov, professor of Electrical Engineering and Automation chair, Institute of Agricultural Engineers, South Ural State Agricultural University (75, Lenin Prospekt, Chelyabinsk, Russia), Dr.Sci. (Engineering), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5773-4839>, ntc-es@mail.ru