ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья
УДК 664.002.5
DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_2_28

Исследование процесса активного вентилирования зерна в послеуборочный период

Александр Николаевич Остриков[1]✉, Максим Васильевич Копылов[2], Евгений Борисович Медведков[3], Ардак Дахарбекович Аскаров[4], Бауржан Кумаргалиевич Нурахметов[5]
[1, 2]Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия
[3, 4, 5]Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан
[1]ostrikov27@yandex.ru✉

Аннотация. Представлены результаты исследований процесса активного вентилирования зерна пшеницы при переменном теплоподводе, проведенных с целью выявления основных кинетических зависимостей процесса активного вентилирования на экспериментальной сушилке с оригинальными узлами ввода, распределения и отвода теплоносителя. Наличие оригинальной конструкции узла отвода отработанного теплоносителя, выполненного в виде сетчатой спиралевидной трубы, позволило добиться оптимизации гидродинамических условий в слое высушиваемого зерна. Кинетика сушки зерновых продуктов исследовалась как при постоянных параметрах процесса, так и в переменном режиме: линейная скорость теплоносителя составляла 0,6 м/с, 1,0 и 1,4 м/с, температура – 65 °С, 75 и 85 °С, влагосодержание теплоносителя в каждом опыте поддерживалось постоянным в интервале значений от 0,001 до 0,025 кг/кг. Для проведения исследований использовался экспериментальный метод сушки зерна, обработку экспериментальных данных проводили с помощью программного комплекса STATISTICA 10. Полученные регрессионные уравнения позволили оценить величину энергозатрат и конечной влажности зерна в зависимости от таких технологических параметров процесса сушки, как высота продуваемого слоя зерна, температура и скорость воздуха. В связи с тем, что исследуемые факторы неоднозначно влияют на удельные энергозатраты, был проведен выбор рациональных условий процесса. В результате оптимизации процесса активного вентилирования зерна были определены рациональные значения высоты продуваемого слоя зерна, скорости и температуры воздуха, обеспечивающие минимальные удельные энергозатраты. Высокие значения коэффициентов достоверности регрессионных уравнений для расчета удельных энергозатрат (92,53%) и конечной влажности $W_к$ (71,75%) свидетельствуют об адекватности полученных уравнений.
***Ключевые слова*:** зерно, активное вентилирование, кинетика, энергозатраты, переменный теплоподвод
***Для цитирования*:** Остриков А.Н., Копылов М.В., Медведков Е.Б., Аскаров А.Д., Нурахметов Б.К. Исследование процесса активного вентилирования зерна в послеуборочный период // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15, № 2(73). С. 28–38. https//:doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_2_28–38.

TECHNOLOGIES AND MEANS OF MECHANIZATION
OF AGRICULTURE (TECHNICAL SCIENCES)

Original article

Investigation of postharvest grain aeration process

Alexander N. Ostrikov[1]✉, Maxim V. Kopylov[2], Evgeniy B. Medvedkov[3], Ardak D. Askarov[4], Baurzhan K. Nurakhmetov[5]
[1, 2]Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia
[3, 4, 5]Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan
[1]ostrikov27@yandex.ru✉

Abstract. The results of studies of the process of wheat grain aeration with variable heat supply, conducted in order to identify the main kinetic dependencies of the process of aeration on an experimental dryer with original input units, distribution and removal of coolant, are presented. Due to original design of the exhaust coolant outlet unit, made in the form of perforated spiral tube, made it possible to optimize the hydrodynamic conditions in the layer of driable material. The kinetics of driable grain products was studied both with constant process parameters and in variable mode: the linear velocity of the coolant was 0.6 m/s, 1.0 and 1.4 m/s, the temperature was 65 °C, 75 and 85 °C, the moisture content of the coolant in each experiment was kept constant in the range of values

from 0.001 to 0.025 kg/kg. An experimental method of grain drying was used for the research, experimental data processing was carried out using the STATISTICA 10 software package. The obtained regression equations allowed estimating the amount of energy consumption and the final moisture content of grain depending on such technological parameters of the drying process as the height of grain layer, temperature and air velocity. Due to the fact that the studied factors have an ambiguous effect on specific energy consumption, a choice of rational process conditions was made. As a result of optimizing the process of grain aeration, rational values of the height of grain layer, air velocity and temperature were determined, ensuring minimum specific energy consumption. The high values of the reliability coefficients of the regression equations for calculating specific energy consumption (92.53%) and the final humidity W_k (71.75%) indicate the adequacy of the equations obtained.
***Keywords*:** grain, aeration, kinetics, energy consumption, variable heat supply
***For citation*:** Ostrikov A.N., Kopylov M.V., Medvedkov E.B., Askarov A.D., Nurakhmetov B.K. Investigation of postharvest grain aeration process. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(2):28-38. (In Russ.). https//:doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_2_28-38.

В современных геополитических условиях первостепенной задачей российских сельхозпроизводителей становится увеличение производства зерна и повышение его качества. Особая роль отводится зерновым и зернобобовым как высокопродуктивным и ценным продовольственным культурам, которые выращиваются на площади около 3 млн гектаров. По данным Росстата, в 2020 г. было собрано 133,5 млн тонн зерна, в том числе 85,9 млн тонн пшеницы (озимой – 63,23 млн т, яровой – 22,67 млн т), а в 2021 г. – 120,7 млн тонн, в том числе 75,9 млн тонн пшеницы. Этот результат стал третьим в истории, вот почему в настоящее время особую значимость приобретают вопросы сохранения собранного урожая.

Сушка зерна является наиболее энергоемким процессом при послеуборочной обработке, при реализации которого затрачиваются значительные количества топлива и электроэнергии, необходимые для работы сушилок [1]. Использование процесса активного вентилирования в послеуборочный период является перспективным методом не только снижения влажности зерна, но и повышения его качества, что наряду с очисткой является важным подготовительным этапом для его продолжительного хранения [2]. Однако высокая начальная влажность свежеубранного зерна, его загрязненность патогенной микрофлорой, вредителями и различными примесями ухудшают его качество при дальнейшем хранении [3]. Применение активного вентилирования позволяет во многом снизить эти негативные эффекты. Однако процессы сушки на токах и элеваторах характеризуются значительными энергозатратами, поэтому используемые технологии сушки зерна в послеуборочный период нельзя признать научно обоснованными и соответствующими кинетическим закономерностям процесса [3].

В промышленности используются четыре основных способа конвективной сушки зерна [1, 3]:

- высокотемпературная сушка;
- высокотемпературная сушка с применением активного вентилирования (двухстадийная сушка);
- сочетание высокотемпературной и низкотемпературной сушки;
- низкотемпературная сушка активным вентилированием.

В работе [1] приведены результаты разработки установки активного вентилирования и классификация типов и бункеров активного вентилирования. Показано, что подбор высоты вентилируемой зоны оказывает влияние на эффективность сушки и очистки от пыли зерновых масс. Но остались нерешенными вопросы, связанные со снижением удельных затрат при активном вентилировании.

Обоснованием выбора рационального способа сушки занимались многие ученые. В частности, в работе [5] приведены результаты комбинированной конвективно-диэлектрической сушки семян канолы, кукурузы, риса-сырца, сои и пшеницы при температуре воздуха 65 °С, удельной мощности 0,3 Вт/г в течение 30 мин. Были изучены

диэлектрические свойства семян канолы, кукурузы, сои, пшеницы и риса. Экспериментальные данные использовались для параметризации стандартных линейных моделей для прогнозирования диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь. Установлена зависимость между диэлектрическими свойствами семян на разных частотах (0,6–3 ГГц) и при разной влажности семян. Результаты показали, что скорость всхожести снизилась для сои, но не для кукурузы. Это может быть связано с твердостью семян кукурузы по сравнению с семенами сои, а также с плотностью зерна, которая у кукурузы выше, чем у сои. Получены две модели: единая модель для прогнозирования диэлектрической проницаемости и модель для прогнозирования коэффициента потерь для пяти типов изученных семян.

F. Rodrıguez-Ramos и др. [9] изучали конвективную сушку *Salicornia fruticosa* (род растений семейства амарантовых) при 50 °С, 60 и 70 °С. Для оценки равновесного содержания влаги была проведена изотерма десорбции с использованием пяти эмпирических моделей: Хэлси, Коури, Хендерсона, Смита и Освина. Экспериментальные данные также были сопоставлены с различными кинетическими моделями сушки: логарифмической, двухчленной, Мидилли-Кучука, экспоненциальной двухчленной. Установлено, что модель Мидилли-Кучука наиболее адекватно описывает кривые сушки *S. fruticosa*. Численное моделирование с использованием метода конечных объемов позволило описать изменение температуры и влажности при сушке. Модель Хендерсона оказалась наиболее подходящей для прогнозирования равновесной влажности *S. fruticosa*.

R.E. Lima и др. [10] исследовали сушку сои с начальной влажностью 18 и 23% при трех температурных режимах – 80 °С, 100 и 120 °С с последующей обработкой полученных данных с помощью иерархического метода Уорда. Ими был получен эффективный коэффициент диффузии $4{,}9\times10^{-10}$ м^2/с. Было установлено, что сушка сои с начальной влажностью 23% горячим воздухом при температуре 80 °С и последующее хранение при температуре менее 23 °С способствовали хорошей сохранности физико-химических свойств сои: она сохраняла высокое содержание масла – 25,89%, сырого протеина – 35,69% и липидов (кислотность – 5,54 мл).

G. Algini и др. [4] опубликовали результаты исследования процесса сушки ячменя в сушилке с неподвижным слоем при двух температурных режимах – 40 и 50 °С, скорости воздуха 4,0 м/с и трех начальных значениях влажности – 25, 20 и 13,5%. При этом применялись два способа подвода теплоносителя: обычное прямоточное движение воздуха и комбинированное (сочетание прямоточного и противоточного движения), т. е. направление потока воздуха меняли каждые 10 минут. Было исследовано распределение влаги вдоль неподвижного слоя и влияние температуры и начальной влажности на скорость сушки. При высокой начальной влажности зерна неоднородность процесса была выше, чем при низкой исходной влажности. Сушка комбинированным воздушным потоком при 50 °С повышала однородность процесса, а прямоточная сушка приводила к улучшению энергетических показателей, что объясняется меньшей продолжительностью сушки до достижения конечной влажности 12% при 50 °С. Результаты экспериментальных исследований показали, что сушка комбинированным воздушным потоком обеспечивает более равномерное распределение влажности по высоте слоя зерна и снижение удельных энергозатрат по сравнению с прямоточной сушкой.

М. Волхонов с соавт. [11] отмечают, что пересушивание зерна приводит к большому перерасходу тепловой энергии – примерно около 58,3 МДж на 1% чрезмерно испарившейся влаги из 1 т высушенного зерна. Исследования показали, что интенсивное увеличение температуры зерна возникает при достижении относительной влажности 15–16%. Поэтому целесообразно зерно с повышенной температурой выгрузить из сушилки и довести до конечной заданной влажности путем охлаждения. При этом качество

зерна сохраняется и исключается возможность перерасхода энергии в результате пересушивания зерна. Для определения продолжительности сушки до достижения стандартной влажности были получены аналитические выражения, использование которых позволяет осуществлять микроконтроллерное программирование и автоматическое управление выдержкой сушки зерна и, как следствие, повысить эффективность процесса сушки в целом.

M. Hemis et al. [6] разработали математический комплекс тепломассопереноса при сушке зерна пшеницы, объединяющей внутридиффузионную и внешнедиффузионную стадии движения влаги, состоящий из модели с распределенными параметрами (модель DPM или Luikov) и конвективной модели. Модель DPM позволила определить количество воды, испаряемой из зерна. Результаты показали, что скорость сушки пшеницы достигает $2{,}6 \cdot 10^{-5}$ кг/(кг·с) и $1{,}7 \cdot 10^{-5}$ кг/(кг·с) при температурах воздуха 66,7 и 58,6 °С. Сравнение экспериментальных и предсказанных результатов дало хорошее совпадение.

Опубликованы результаты исследований, выполненных с целью определения влияния температуры воздуха и начальной влажности на объемную усадку, физические качества и выход масла из сои [8]. Для исследования процесса конвективной сушки были выбраны бобы сои с начальной влажностью 19 и 25%, которые высушивались при трех температурных режимах – 75 °С, 90 и 105 °С. Результаты показали сокращение времени сушки при увеличении расхода воздуха и повышении его температуры. Кроме того, показано, что чем выше была температура воздуха, тем больше была усадка слоя сои. Сушка сои с начальной влажностью 25% при температуре воздуха 105 °С не влияла на выход масла при последующем прессовании.

В работе [7] предложен эмпирико-математический подход к моделированию кинетики процесса сушки зерновых культур при переменном теплоподводе с использованием метода сшивания решений, который позволил определить распределение температурных полей в слое зерна и обосновать допустимую область термовлажностных условий при сушке зерновых культур с регулируемой величиной удельной нагрузки продукта на газораспределительную решетку. Разработан рациональный подход к проектированию зерносушилок с регулируемой величиной удельной нагрузки продукта на газораспределительную решетку.

Эксплуатируемые в настоящее время установки для активного вентилирования зерна не учитывают все сложности процесса и не позволяют соблюдать рациональные режимы сушки, что отражается на качестве зерна, поэтому особое внимание уделяется разработке научно обоснованных режимов процесса активного вентилирования зерна и его аппаратурному оформлению.

Материалы и методы

Целью проведенного исследования являлся поиск рациональных режимов процесса сушки зерна в послеуборочный период, а также разработка статистической модели активного вентилирования с подбором оптимального соотношения высоты продуваемой зоны.

Для достижения заявленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- обосновать и выбрать рациональные режимы процесса активного вентилирования для реализации в предлагаемой конструкции установки для активного вентилирования зерна;
- рассчитать высоту слоя зерна в сушильной камере.

Исследование процесса активного вентилирования зерна зернобобовых культур при переменном теплоподводе проводили на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 1.

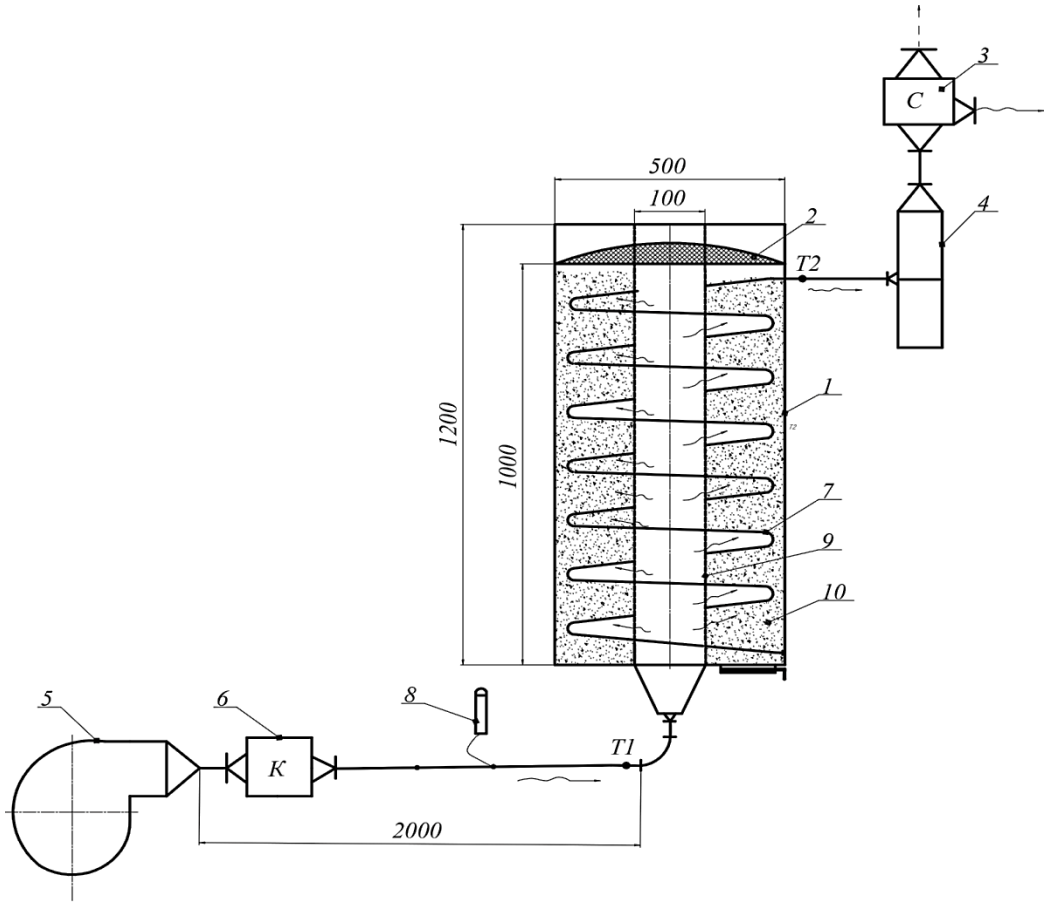

Рис. 1. Экспериментальная установка для активного вентилирования зерна при переменном теплоподводе: 1 – сушильная камера; 2 – крышка; 3 – конденсатор; 4 – всасывающий вентилятор; 5 – нагнетающий вентилятор; 6 – электрокалорифер; 7 – спиралевидная сетчатая трубка; 8 – портативный анемометр; 9 – перфорированная газораспределительная труба; 10 – зерновая масса

Экспериментальная установка состоит из вертикальной цилиндрической сушильной камеры 1, крышки 2, циклон-очистителя 3, всасывающего 4 и нагнетающего 5 вентиляторов.

Сушильная камера 1 представляет собой цилиндр диаметром 500 мм и высотой 1200 мм. Начальная высота слоя зерна составляла 1000 мм. Это дает возможность практически устранить пристеночный эффект, так как соотношение диаметров камеры и зерен превышало критическое, равное 16 : 20.

Нагнетающий вентилятор 5 подает воздух, предварительно нагретый в электрокалорифере 6, через воздуховод в перфорированную газораспределительную трубу 9 диаметром 100 мм (диаметр отверстий составляет 2 мм). Установленные в электрокалорифере 6 трубчатые электронагреватели (ТЭНы) типа «С» обеспечивают равномерный нагрев теплоносителя (воздуха) до заданной температуры.

Горячий теплоноситель (воздух), проходя через отверстия в перфорированной газораспределительной трубе 9, поступает в сушильную камеру 1, в которой равномерно распределяется в межзерновом пространстве.

Внутри сушильной камеры 1 по всей ее высоте установлена по винтовой линии всасывающая полая сетчатая труба 7, выполненная из металлопластика (длина спиральной трубы 7 составляет 6 м, внутренний диаметр 25 мм и наружный диаметр 32 мм). Внутрь этой сетчатой трубы 7 поступает отработанный теплоноситель. Шаг спирали трубы 7 был выбран в четыре раза меньше высоты продуваемой зоны с целью равномер-

ного удаления отработанного теплоносителя из слоя зерна. Для предотвращения попадания зерен в спиралевидную трубку 7, отверстия были выполнены сбоку со стороны газораспределительной трубы через каждые 5 см размером 2×15 мм.

Температура воздушного потока измеряется после калорифера 6 в точке Т1 и во всасывающем воздуховоде в точке Т2. Температура воздуха регулируется с помощью терморегулятора, который установлен после калорифера в воздуховоде. Скорость воздушного потока для каждого опыта замеряли с помощью анемометра 8 (в экспериментах был использован анемометр Testo 416, производитель – фирма Testo AG, Германия, диапазон измерения – 0,6–40,0 м/с, серийный номер 03621531).

Для установления и регулирования заданного значения температуры теплоносителя использовались: программно-аппаратный модуль (измеритель) с программой регистрации значений температуры; хромель-копелевые термопары (диаметр электродов 0,1 мм) и система световой индикации работы ТЭНов. Требуемая температура теплоносителя на входе в рабочую камеру поддерживалась работой ТЭНов с помощью системы автоматического регулирования температуры.

Посредством термопары ТХК снимался электрический сигнал, пропорциональный температуре теплоносителя на входе в слой зерна. Сигнал поступал в программно-аппаратный модуль (измеритель) с регулирующим блоком, где сравнивался с заданным значением температуры. В случае разбаланса регулятор подавал сигнал на исполнительный механизм, который включает или выключает электрокалорифер 6. За температуру зерна принималась температура, измеренная с помощью термопары, введенной в единичное зерно и расположенное в середине зернового слоя. Отклонение температуры от заданной не превышало ±1 К.

Контроль относительной влажности теплоносителя на входе и выходе из слоя зерна осуществлялся гигрометром «Волна-1М», датчики которого устанавливались в подводящем воздуховоде 8 и линии отвода отработанного теплоносителя. Гигрометр «Волна-1М» представляет собой сорбционно-частотный одноканальный однофункциональный цифровой переносной прибор с диапазоном измерения от 0 до 99,9% при температуре от 0 до 358 К, скорости потока анализируемой среды от 0 до 15 м/с и абсолютной погрешности 1,5%.

Опыты проводились с зерном озимой пшеницы сорта Мироновская урожая 2020–2021 сельскохозяйственного года. Влажность зерна, поступающего с полей на хранение в элеваторы, как правило, изменяется от 13–14% до 17–18%, поэтому в экспериментах использовали зерно с этим диапазоном изменения влажности.

Влажность высушенного зерна определялась методом высушивания проб в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 403 К в течение 40 минут.

Кинетика сушки зерновых продуктов исследовалась как при постоянных параметрах процесса, так и в переменном режиме:

- линейная скорость теплоносителя – 0,6 м/с, 1,0 и 1,4 м/с;
- температура воздуха – 65 °С, 75 и 85 °С.

Влагосодержание теплоносителя в каждом опыте поддерживалось постоянным в интервале значений от 0,001 до 0,025 кг/кг.

Переменные режимы теплоподвода обеспечивались регулированием температуры теплоносителя в электрокалорифере 6 согласно программе, заложенной в систему автоматического программного управления температурой. Загрузка зерна в сушильную камеру 1 осуществлялась через загрузочное устройство до величины удельной нагрузки 1800 Н/м^2. Продолжительность сушки до достижения конечной влажности 12% составляла 40–45 мин. В экспериментах использовали зерно с начальной влажностью 17–18%.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований по активному вентилированию зерна приведены в таблице. Для обработки экспериментальных данных использовали программный комплекс STATISTICA 10.

Результаты экспериментальных исследований по активному вентилированию зерна

$\upsilon_в$, м/с	T, °С	$H_{слоя}$, м	E, кДж/кг	$W_н$, %	$W_к$, %
0,762	69,055	0,721	199,4	18	11
0,762	69,055	1,078	213,2	18	12
0,762	80,945	0,721	204,3	18	11
0,762	80,945	1,078	192,3	18	11
1,238	69,055	0,721	233,5	18	12,5
1,238	69,055	1,078	164,2	18	12
1,238	80,945	0,721	162,3	18	11
1,238	80,945	1,078	142,4	18	11,5
0,6	75	0,9	205,6	18	11
1,4	75	0,9	172,6	18	11
1	65	0,9	211,2	18	11,5
1	85	0,9	176,2	18	11
1	75	0,6	186,2	18	11
1	75	1,2	170,2	18	12
1	75	0,9	151,5	18	11
1	75	0,9	151,5	18	11
1	75	0,9	151,5	18	11
1	75	0,9	151,5	18	11

В качестве основных параметров были выбраны:

- скорость воздуха при входе в слой продуваемого зерна $\upsilon_в$, м/с;
- температура воздуха, °С;
- высота продуваемого слоя зерна в сушильной камере, м.

Выбранные факторы совместимы и некоррелируемы между собой.

Анализ данных, приведенных на рисунках 2-4, показывает, что минимальные энергозатраты приходятся на диапазон высоты продуваемой зоны 0,9–1,1 м, при этом температура воздуха должна быть 76–80 °С, скорость воздуха – 1,1–1,4 м/с.

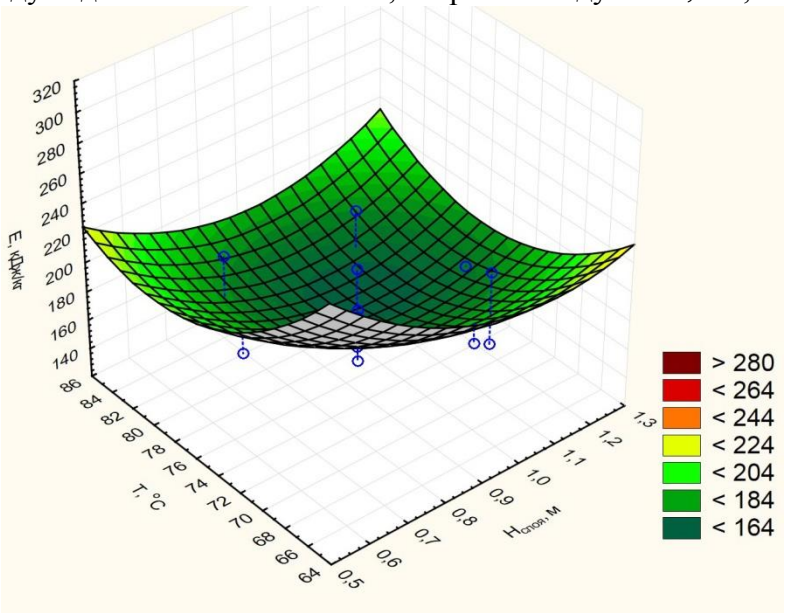

Рис. 2. Зависимость удельных энергозатрат (E, кДж/кг) от высоты продуваемого слоя зерна ($H_{слоя}$, м) и температуры воздуха (T, °С):
$E = 2644{,}196 – 630{,}534 \cdot H_{слоя} – 55{,}897 \cdot T + 208{,}305 \cdot H^2_{слоя} + 2{,}783 \cdot H_{слоя} \cdot T + 0{,}342 \cdot T^2$

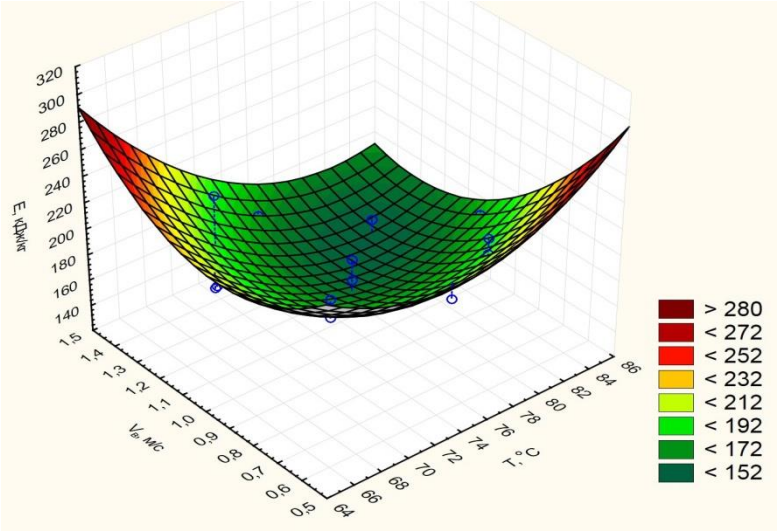

Рис. 3. Зависимость удельных энергозатрат (*E*, кДж/кг) от температуры воздуха (*T*, °C) и скорости воздуха ($\upsilon_в$, м/с):
$$E = 2109{,}231 - 50{,}021 \cdot T + 61{,}348 \cdot \upsilon_в + 0{,}365 \cdot T^2 - 6{,}803 \cdot T \cdot \upsilon_в + 199{,}447 \cdot \upsilon_в^2$$

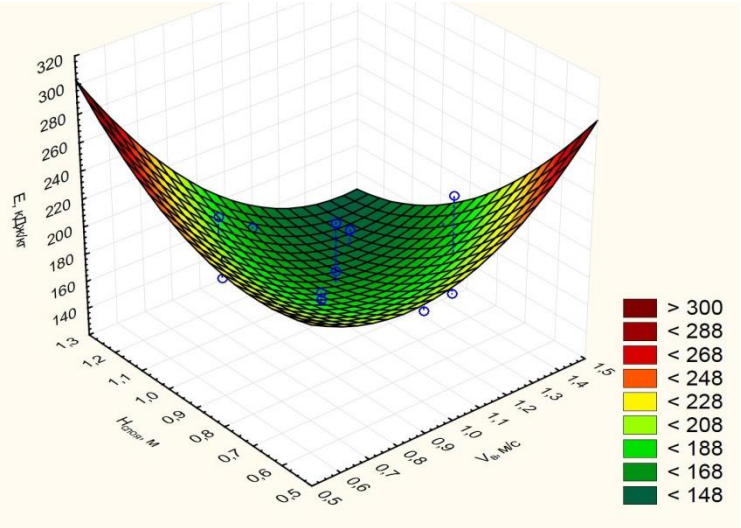

Рис. 4. Поверхность отклика удельных энергозатрат (*E*, кДж/кг) в зависимости от скорости воздуха ($\upsilon_в$, м/с) и высоты продуваемого слоя зерна ($H_{слоя}$, м):
$$E = 357{,}928 - 167{,}377 \cdot \upsilon_в - 134{,}771 \cdot H_{слоя} + 179{,}12\ \upsilon_в^2 - 267{,}657 \cdot \upsilon_в \cdot H_{слоя} + 197{,}55 \cdot H^2_{слоя}$$

Коэффициент достоверности для регрессионных уравнений для расчета удельных энергозатрат (*E*, кДж/кг), приведенных на рисунках 2–4, составляет 92,53%.

В связи с тем, что исследуемые факторы (скорость воздуха и высота продуваемой зоны) неоднозначно влияют на удельные энергозатраты, выбор рациональных параметров процесса был проведен методом Харрингтона.

Задача оптимизации процесса активного вентилирования зерна заключалась в поиске условий, при которых удельные энергозатраты были минимальными при сбалансированном соотношении скорости и температуры воздуха и высоты продуваемого слоя зерна (рис. 2–4).

На рисунках 5–7 приведены поверхности отклика и соответствующие регрессионные уравнения, которые дают возможность определить величину конечной влажности зерна в зависимости от высоты продуваемого слоя зерна, скорости и температуры воздуха. Тем самым обосновывается требуемая высота сушильной камеры для рациональных режимов процесса активного вентилирования.

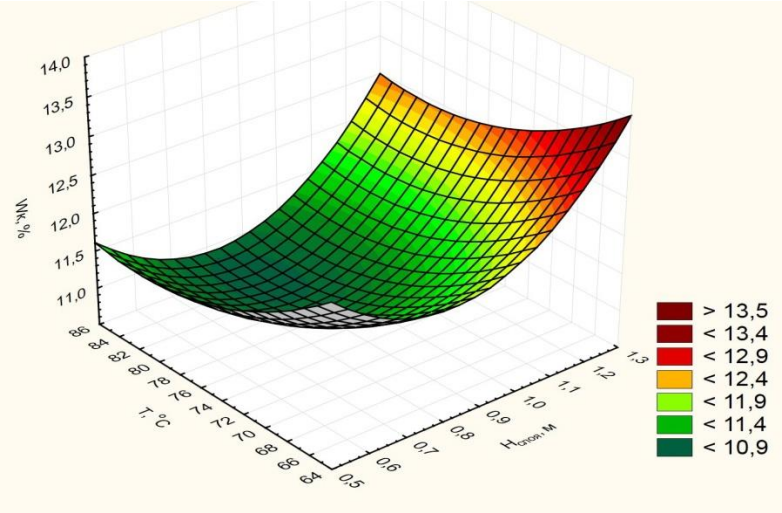

Рис. 5. Поверхность отклика конечной влажности *($W_к$*, %) в зависимости от температуры воздуха (*T*, °C) и высоты продуваемого слоя зерна ($H_{слоя}$, м):
$$W_к = 39{,}6191 - 11{,}2107 \cdot H_{слоя} - 0{,}5934 \cdot T + 6{,}8307 \cdot H^2_{слоя} + 0{,}0002 \cdot H_{слоя} \cdot T + 0{,}0036 \cdot T^2$$

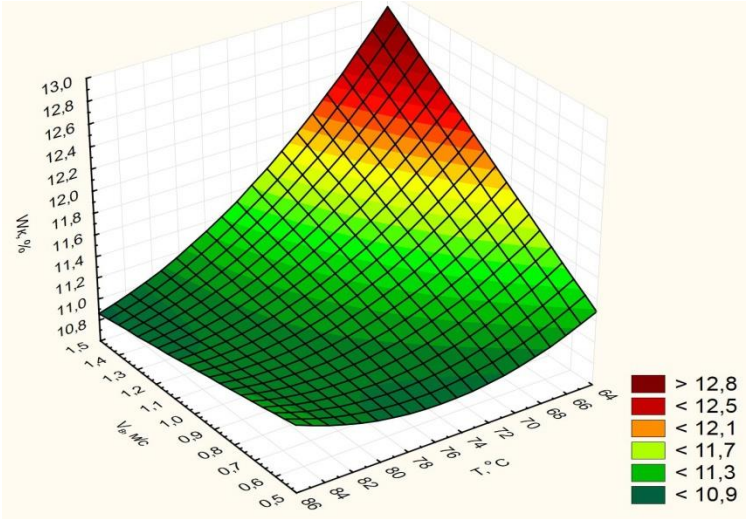

Рис. 6. Поверхность отклика конечной влажности *($W_к$*, %) в зависимости от температуры (*T*, °C) и скорости воздуха ($\upsilon_в$, м/с):
$$W_к = 22{,}1649 + 7{,}1244 \cdot \upsilon_в - 0{,}3474 \cdot T + 0{,}0586 \cdot \upsilon_в^2 \cdot T - 0{,}0883 \upsilon_в \cdot T + 0{,}0026 \cdot T^2$$

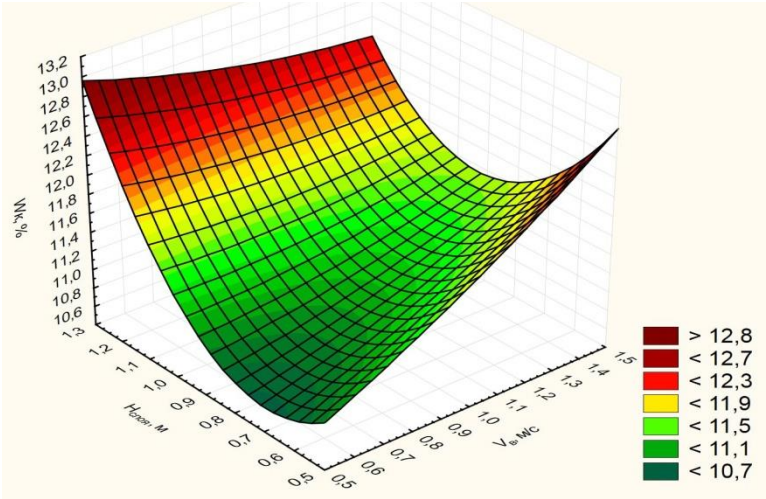

Рис. 7. Поверхность отклика конечной влажности $W_к$ в зависимости от скорости воздуха ($\upsilon_в$, м/с) и высоты продуваемого слоя зерна ($H_{слоя}$, м):
$$W_к = 12{,}3267 + 2{,}4946 \cdot \upsilon_в - 7{,}1986 \cdot H_{слоя} + 0{,}3872 \cdot \upsilon_в^2 - 2{,}9492 \cdot \upsilon_в \cdot H_{слоя} + 6{,}2502 \cdot H^2_{слоя}$$

Коэффициент достоверности для регрессионных уравнений для расчета конечной влажности $W_к$, приведенных на рисунках 5–7, составляет 71,75%.

Учитывая результаты построения поверхностей отклика по зависимости удельных энергозатрат (рис. 2–4) и конечной влажности (рис. 5–7) от высоты продуваемого слоя зерна, температуры воздуха, скорости воздуха, можно сделать вывод, что рациональным решением является высота продуваемой камеры, равная 1 м.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования по поиску рациальных режимов сушки активному вентилированию зерна, обработанные с помощью программного комплекса STATISTICA 10, позволили получить регрессионные уравнения расчета величин затрачиваемой энергии и конечной влажности зерна в зависимости от технологических параметров процесса сушки (высоты продуваемого слоя зерна, температуры и скорости воздуха).

В результате оптимизации процесса активного вентилирования зерна были определены рациональные значения высоты продуваемого слоя зерна (0,9–1,1 м), скорости (1,1–1,4 м/с) и температуры воздуха (76–80 °С), обеспечивающие минимальные удельные энергозатраты.

Высокие значения коэффициентов достоверности для регрессионных уравнений расчета удельных энергозатрат (92,53%) и для расчета конечной влажности $W_к$ (71,75%) свидетельствуют об адекватности полученных уравнений.

Список источников

1. Бритиков Д.А., Шевцов А.А. Энергосбережение в процессах сушки зерновых культур с использованием теплонасосных технологий: монография. Воронеж: ВГТА, 2011. 375 с.

2. Сорочинский В.Ф., Догадин А.Л. Контроль процесса сушки зерна по параметрам отработавшего агента сушки // *Хлебопродукты. 2018. № 3. С. 49–53.*

3. Шевцов С.А., Остриков А.Н. Техника и технология сушки пищевого растительного сырья. Воронеж: ВГУИТ, 2014. 289 с.

4. Albini G., Freire F.B., Freir J.T. Barley: effect of airflow reversal on fixed bed drying // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2018. Vol. 134. Pp. 97–104. DOI: 10.1016/j.cep.2018.11.001.

5. Coradi P.C., Fernandes C.H.P., Helmich J.C., Goneli A.L.D. Effects of drying air temperature and grain initial moisture content on soybean quality (*Glycine max* (L.) Merrill) // Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering. 2016. Vol. 36(5). Pp. 866–876. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p866-876/2016.

6. Hemis M., Watson D.G., Gariépy Yv., Lyew D., Raghavan V. Modelling study of dielectric properties of seed to improve mathematical modelling for microwave-assisted hot-air drying // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. 2019. Vol. 53(2). Pp. 94–114. DOI: 10.1080/08327823.2019.1607491.

7. Hemis M., Watson D.G., Raghavan V. Modeling the drying of wheat seeds in a fluidized bed using a spatially resolved model // Applied Engineering in Agriculture. 2019. Vol. 35(4). Pp. 551–559.

8. Lima R.L., Coradi P.C., Nunes M.T., […], Campabadal C. Mathematical modeling and multivariate analysis applied earliest soybean harvest associated drying and storage conditions and influences on physicochemical grain quality // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Article No. 23287. DOI:10.1038/s41598-021-02724-y.

9. Ostrikov A., Shevtsov A., Vasilenko V., Ospanov A., Timurbekova A. An empirical-mathematical modelling approach to explore the drying kinetics of cereals under variable heat supply using the stitched method // Acta Agriculturae Scandinavica. Section B: Soil & Plant Science. 2021. Pp. 1–10. DOI: 10.1080/09064710.2021.1947360.

10. Rodríguez-Ramos F., Leiva-Portilla D., Rodríguez-Núñez K., Pacheco P., Briones-Labarca V. Mathematical modeling and quality parameters of *Salicornia fruticosa* dried by convective drying // Journal of Food Science and Technology. 2021. Vol. 58. Pp. 474–483. DOI: 10.1007/s13197-020-04556-6.

11. Volkhonov M., Jabbarov I., Soldatov V., Smirnov I. Development of the method of exposure control of grain drying in high-temperature dryers // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2013. Vol. 3(3). Pp. 22–29. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.133607.

References

1. Britikov D.A., Shevtsov A.A. Energosberezhenie v protsessakh sushki zernovykh kul'tur s ispol'zovaniem teplonasosnykh tekhnologij : monografiya [Energy saving in grain drying processes using heat pump technologies : monograph]. Voronezh: Voronezh State Technological Academy Press; 2011. 375 p. (In Russ.).

2. Sorochinskiy V.F., Dogadin A.L. Kontrol' protsessa sushki zerna po parametram otrabotavshego agenta sushki [Control of the grain drying process according to the parameters of the spent drying agent]. *Khleboprodukty = The Khleboprodukty Magazine*. 2018;3:49-53. (In Russ.).

3. Shevtsov S.A., Ostrikov A.N. Tekhnika i tekhnologiya sushki pishchevogo rastitel'nogo syr'ya [Technique and technology of drying food vegetable raw materials]. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies Press; 2014. 289 p. (In Russ.).

4. Albini G., Freire F.B., Freir J.T. Barley: effect of airflow reversal on fixed bed drying. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2018;134:97-104. DOI: 10.1016/j.cep.2018.11.001.

5. Coradi P.C., Fernandes C.H.P., Helmich J.C., Goneli A.L.D. Effects of drying air temperature and grain initial moisture content on soybean quality (*Glycine Max* (L.) Merrill). *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*. 2016;36(5):866-876. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p866-876/2016.

6. Hemis M., Watson D.G., Gariépy Yv., Lyew D., Raghavan V. Modelling study of dielectric properties of seed to improve mathematical modelling for microwave-assisted hot-air drying. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2019;53(2):94-114. DOI: 10.1080/08327823.2019.1607491.

7. Hemis M., Watson D.G., Raghavan V. Modeling the drying of wheat seeds in a fluidized bed using a spatially resolved model. *Applied Engineering in Agriculture*. 2019;35(4):551-559.

8. Lima R.L., Coradi P.C., Nunes M.T., […], Campabadal C. Mathematical modeling and multivariate analysis applied earliest soybean harvest associated drying and storage conditions and influences on physicochemical grain quality. *Scientific Reports*. 2021;11:23287. DOI: 10.1038/s41598-021-02724-y.

9. Ostrikov A., Shevtsov A., Vasilenko V., Ospanov A., Timurbekova A. An empirical-mathematical modelling approach to explore the drying kinetics of cereals under variable heat supply using the stitched method. *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B: Soil & Plant Science*. 2021:1-10. DOI: 10.1080/09064710.2021.1947360.

10. Rodríguez-Ramos F., Leiva-Portilla D., Rodríguez-Núñez K., Pacheco P., Briones-Labarca V. Mathematical modeling and quality parameters of *Salicornia fruticosa* dried by convective dryin. *Journal of Food Science and Technology*. 2021;58:474-483. DOI: 10.1007/s13197-020-04556-6.

11. Volkhonov M., Jabbarov I., Soldatov V., Smirnov I. Development of the method of exposure control of grain drying in high-temperature dryers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013;3(3):22-29. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.133607.

Информация об авторах

А.Н. Остриков – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», ostrikov27@yandex.ru.

М.В. Копылов – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», kopylov-maks@yandex.ru.

Е.Б. Медведков – доктор технических наук, профессор, директор центра инновационных образовательных технологий АО «Алматинский технологический университет», evg_bm@mail.ru.

А.Д. Аскаров – лектор кафедры машин и аппаратов производственных процессов АО «Алматинский технологический университет», ardak_198282@mail.ru.

Б.К. Нурахметов – доктор технических наук, профессор, первый проректор АО «Алматинский технологический университет», b.nurakhmetov@mail.ru.

Information about the authors

A.N. Ostrikov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Fat Technology, Processes and Apparatus of Chemical and Food Production, Voronezh State University of Engineering Technologies, ostrikov27@yandex.ru.

M.V. Kopylov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Fat Technology, Processes and Apparatus of Chemical and Food Production, Voronezh State University of Engineering Technologies, kopylov-maks@yandex.ru.

E.B. Medvedkov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Director of the Center for Innovative Educational Technologies, Almaty Technological University, evg_bm@mail.ru.

A.D. Askarov, Lecturer, the Dept. of Machines and Devices of Manufacturing Processes, Almaty Technological University, ardak_198282@mail.ru.

B.K. Nurakhmetov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, First Vice-Rector, Almaty Technological University, b.nurakhmetov@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 10.02.2022; одобрена после рецензирования 20.04.2022; принята к публикации 28.04.2022.

The article was submitted 10.02.2022; approved after revision 20.04.2022; accepted for publication 28.04.2022.

© Остриков А.Н., Копылов М.В., Медведков Е.Б., Аскаров А.Д., Нурахметов Б.К., 2022