

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ С ВИБРАЦИОННЫМ ТРАНСПОРТИРУЮЩИМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

Прошкин Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования»

Курдюмов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Каняева Ольга Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сервис и механика»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1; тел.: 89278250499; e-mail: andrejpavlu@yandex.ru

Ключевые слова: зерно, движение, рабочий орган, параметры, конструкция, колебания.

Важно создавать сельскохозяйственные машины, отвечающие таким основным параметрам, как энерго-, ресурсоэффективность, универсальность, надёжность и эргономичность. Выявлено, что в цикле послеуборочных работ наиболее энергозатратным и необходимым является процесс сушки зерна.

Существующие и серийно выпускаемые зерносушилки имеют значительные недостатки, что приводит к нецелесообразности их использования в аграрных зерноперерабатывающих хозяйствах России. В Ульяновском ГАУ имеется богатый опыт решения проблемы качественного технического обеспечения процесса удаления влаги из зерна на основе использования контактных зерносушилок. Важным элементом разрабатываемых контактных зерносушилок является транспортирующий рабочий орган, который должен обеспечивать равномерность подачи обрабатываемого зерна от загрузочного бункера до выгрузочного окна зерносушилки, при этом важно, чтобы зерно двигалось слоем, толщина которого незначительно превышает максимальные параметры единичной зерновки культуры, подвергаемой сушке. Кроме того, необходимо обеспечить качественный подвод теплоты от поверхности транспортирующего рабочего органа к зерну. Целью проводимых исследований стало научное обоснование параметров вибрационного транспортирующего рабочего органа контактной зерносушилки. При этом для разработки и научного обоснования оптимальных конструктивных параметров транспортирующего рабочего органа вибрационного типа необходимо учитывать интегральное действие и конструктивных, и режимных факторов, оказывающих влияние на обеспечение равномерной и энергоэффективной сушки зерна. В результате проведённых экспериментальных исследований определены оптимальные значения выбранных независимых факторов, которые оказывают наибольшее влияние на критерий оптимизации: $\tau = 8$ с, $v_{зс} = 0,22$ м/с и $t_{эн} = 132$ °С. При этом удельные затраты энергии на процесс сушки зерна составили $4,67$ МДж/кг_{влаги}.

Введение

Современный вклад отечественных промышленных предприятий сельскохозяйственного машиностроения в валовый внутренний продукт составляет 0,13 % (в Германии - 0,35 %). Кроме того, наблюдается критическая недооснащённость и высокая степень износа сельскохозяйственной техники в стране [1].

В то же время у отечественных производителей сельскохозяйственных машин увеличивается спрос на качественную сельскохозяйственную технику. При этом основными параметрами, которым должна удовлетворять современная аграрная техника, являются энерго-, ресурсоэффективность, обеспечение требуемых качественных показателей сельскохозяйственных процессов, универсальность, надёжность и эргономичность [2].

Следует отметить, что увеличение производства зерна для обеспечения продовольственной безопасности страны по-прежнему остаётся одной из основных задач аграрного

производства, для решения которой необходимо соответствующее техническое обеспечение. При относительно высоких темпах развития отечественными предприятиями производства тракторной и комбайновой техники темпы разработки и внедрения средств механизации зерноперерабатывающей отрасли в настоящее время недостаточны. Так, импортная техника значительно превосходит отечественные аналоги по энергоэффективности, безопасности и экологичности производства, а также многим другим важным технологическим показателям [3].

С учетом вышесказанного, несомненно, актуальным направлением развития сельского хозяйства является разработка и внедрение высокоэффективных отечественных технических средств послеуборочной обработки зерна, соответствующих мировому уровню развития техники и технологий.

В цикле послеуборочных работ необходимым, но при этом наиболее энергозатратным является процесс сушки зерна. Согласно стати-



Рис. 1 – Классификация контактных зерносушилок

стическим данным доля теплового воздействия на зерно, с целью доведения его влажности до кондиционной, в общемировом объеме потребления энергетических ресурсов превышает 40 % [4].

Таким образом, научное обоснование перспективных технических решений, на основе которых возможно создание качественной энергоэффективной отечественной зерносушильной техники является важной задачей.

Объекты и методы исследований

Проанализировав существующие, выпускаемые промышленностью зерносушилки и оценив эффективность их эксплуатации в цикле работ по послеуборочной обработке зерна, мы выявили существенные недостатки, которые приводят к нецелесообразности использования существующей техники в аграрных зерноперерабатывающих хозяйствах России. Одним из перспективных направлений решения проблемы качественного технического обеспечения процесса удаления влаги из зерна является использование контактных зерносушилок, разработанных в Ульяновском ГАУ [1].

Важным элементом разрабатываемых контактных зерносушилок является транспортирующий рабочий орган (рисунок 1). В зерносушилках контактного типа этот элемент должен удовлетворять нескольким задачам. Так, необходимо обеспечить равномерность подачи об-

рабатываемого зерна от загрузочного бункера до выгрузного окна зерносушилки. При этом важно, чтобы зерно двигалось слоем, толщина которого незначительно превышает максимальные параметры единичной зерновки высушиваемой культуры.

Кроме того, необходимо обеспечить качественный подвод теплоты от поверхности транспортирующего рабочего органа к зерну, а также требуется обеспечить постоянное ворошение зерновок с целью повышения площади их контакта с греющей поверхностью. Проведённые исследования, посвященные использованию в контактных зерносушилках винтового и скребокый транспортёров, выявили их эффективность для обеспечения качественного ворошения и равномерности подачи. Однако также были определены и недостатки при обеспечении необходимой толщины зернового слоя – в рассматриваемых зерносушилках этот показатель, как правило, превышен. Для устранения указанного недостатка одним из перспективных направлений является использование вибрационного транспортирующего органа.

Целью проводимых исследований стало научное обоснование параметров контактной зерносушилки с вибрационным транспортирующим рабочим органом.

Для проведения исследований нами была разработана лабораторная зерносушилка (рис.

2) [5, 6].

Отличительной чертой разработанной зерносушилки является установка транспортирующего рабочего органа с возможностью обеспечения его колебательного движения, а также выполнение верхней (греющей) поверхности рабочего органа ступенчатой. Это обеспечивает равномерное распределение зерна по всей рабочей зоне транспортирующего рабочего органа. При работе сушилки зерновой слой, передвигаемый транспортирующим рабочим органом к выгрузному окну, постоянно перемешивается, равномерно нагреваясь тепловым потоком, что, в конечном итоге, улучшает качество сушки.

Движение вибрационного транспортирующего рабочего органа можно без особых погрешностей принять за прямолинейное гармоническое колебательное движение, скорость которого зависит от параметров привода.

Обрабатываемое зерно по поверхности вибрационного транспортирующего рабочего органа перемещается слоем, толщина которого соизмерима с толщиной единичного зернового слоя (рисунок 3). Решение задачи об относительном движении зернового слоя с учётом всех взаимодействий между частицами возможно только при учёте следующих допущений:

1) движение отдельного зерна в зерновом слое рассматриваем как движение отдельной материальной частицы;

2) силу сопротивления перемещению зернового слоя по поверхности вибрационного транспортирующего рабочего органа принимаем равной силе трения;

3) полагаем, что вибрационный транспортирующий рабочий орган, а вместе с ним и материальная частица совершают гармонические колебания.

Находящееся на транспортирующем рабочем органе зерно движется и одновременно подвергается тепловому воздействию. Для равномерности распределения обрабатываемого зерна по греющей поверхности транспортирующего рабочего органа и обоснования требуемого периода нахождения зерна на греющей по-

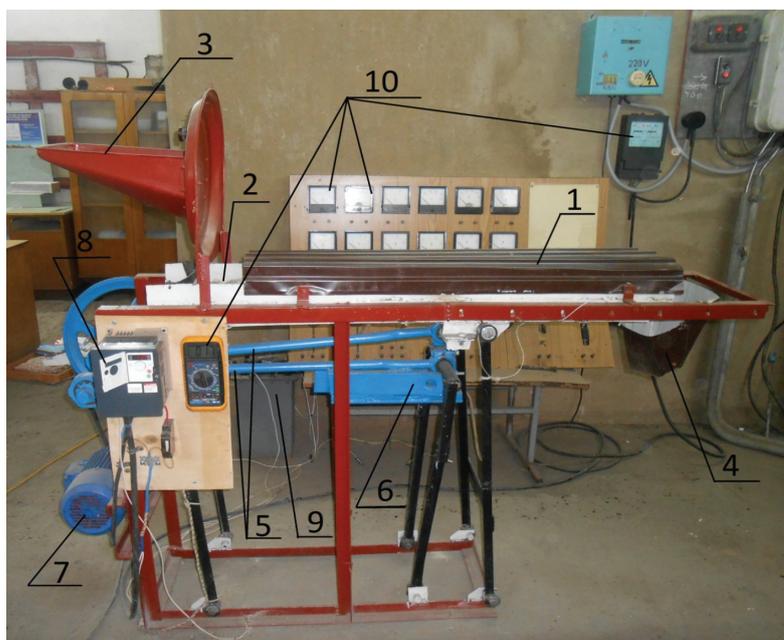


Рис. 2 – Лабораторная контактная зерносушилка с вибрационным транспортирующим рабочим органом:

1 – кожух; 2 – вибрационный транспортирующий рабочий орган; 3 – загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – кривошипно-шатунный механизм; 6 – противовес; 7 – электропривод; 8 – частотный преобразователь; 9 – автотрансформатор; 10 – контрольно-измерительная аппаратура



Рис. 3 – Распределение обрабатываемого зерна по поверхности транспортирующего рабочего органа в контактной зерносушилке

верхности (экспозиции сушки) необходимо выявить скорость движения зернового слоя, м/с:

$$v_{zc} = \frac{l_{zn}}{\tau},$$

где l_{zn} – длина греющей поверхности транспортирующего рабочего органа вибрационного типа, м; τ – экспозиция сушки, с.

Длину греющей поверхности транспортирующего рабочего органа вибрационного типа также можно определить из выражения:

$$l_{zn} = \frac{m_{zc}}{b_{zn} \cdot h_{zc} \cdot \rho_{zc}},$$

где m_{zc} – масса зернового слоя, находящегося на греющей поверхности, кг; b_{zn} – ширина греющей поверхности транспортирующего рабочего органа вибрационного типа, м; ρ_{zc} – насыпная плотность обрабатываемого зернового слоя, кг/м³.

Следует отметить, что при разработке и научном обосновании оптимальных конструктивных параметров транспортирующего рабочего органа вибрационного типа необходимо учитывать интегральное действие и конструктивных, и режимных факторов, оказывающих влияние на равномерность нагрева и энергоэффективность сушки зерна.

При обосновании основных режимных показателей работы предлагаемого средства механизации примем, что изменение температуры будет осуществляться только в одном направлении x (по толщине находящегося на вибрационном транспортирующем рабочем органе зернового слоя), а в двух других направлениях - y и z температура будет оставаться неизменной ($\Delta t = 0$). Следовательно, рассматриваемую задачу можно считать одномерной.

Зададим краевые условия распределения температуры по толщине зернового слоя для рассматриваемого случая.

$$\left. \begin{aligned} t(0, \tau) &= f(x) \\ t_{\Gamma\Pi} &= const \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где c – экспозиция сушки, с; $t_{\Gamma\Pi}$ – температура греющей поверхности (верхней поверхности транспортирующего рабочего органа зерносушилки), °С.

Решим поставленную задачу методом разделения переменных. Предположим, что функция чётная, т. е. поэтому:

$$\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x} \right)_{x=0} = 0.$$

В этом случае граничные условия можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} t(0, \tau) &= t_{zc} \\ \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

Полученная зависимость характеризует условия распределения температуры по толщине зернового слоя зерносушилки в любой момент сушки.

Запишем частное решение дифференциального уравнения теплопроводности для рассматриваемого случая.

$$t(x, \tau) = C \sin kx e^{-ak^2\tau} + D \cos kx e^{-ak^2\tau}, \quad (3)$$

где k – коэффициент влагопроводности слоя зерна, м²/с; a – теплоёмкость зернового слоя, кДж/(кг·°С); α – коэффициент температуропроводности, м²/с; b – коэффициент диффузии, м²/с, h – толщина зернового слоя, м.

При этом:

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \lim_{x \rightarrow 0} (kC \cos kx - kD \sin kx) e^{-ak^2\tau} = kC e^{-ak^2\tau} = 0,$$

откуда $C = 0$, так как на протяжении всего процесса сушки зерна (τ) не равно нулю.

Общее решение для рассматриваемого случая будет выглядеть следующим образом:

$$t(x, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos(2n-1) \frac{\pi x}{2b} \exp[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 a \tau}{4 b^2}]. \quad (4)$$

Постоянные в каждом частном решении будут иметь свои собственные значения, так как сумма частных распределений температуры для любого заданного времени представляет собой действительное распределение температуры.

Таким образом, наложение косинусоид даёт действительную кривую распределения температуры, в том числе и начальное распределение температуры по греющей поверхности зерносушилки.

После проведённых преобразований получим решение уравнения (3) для случая, когда нижняя поверхность транспортирующего рабочего органа имеет качественную теплоизоляцию ($\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x_{из}} = 0$):

$$t(x, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n \frac{x}{b} e^{-\mu_n^2 \frac{a \tau}{b^2}} \cdot \frac{2}{b} \int_0^b f(x) \cos \mu_n \frac{x}{b} dx, \quad (5)$$

где $\mu_n = k_n b = (2n-1) \frac{\pi}{2}$; n , b , a , τ – параметры, характеризующие теплоизолирующий материал.

Полученная зависимость позволяет обосновать распределение теплоты по толщине зернового слоя разрабатываемой зерносушилки.

Результаты исследований

Основными исследуемыми факторами процесса сушки зерна в разработанной зерносушилке, характеризующими суммарное воздействие конструктивных и режимных параметров, послужили температура греющей поверхности

и средняя скорость движения зерна. Указанные параметры обоюдно воздействовали на критерий оптимизации исследуемого процесса – суммарные удельные затраты энергии на удаление влаги из зерна.

При этом уравнение регрессии, характеризующее влияние основных действующих факторов на затраты энергии в контактной зерносушилке, выглядит следующим образом (в натуральных значениях факторов):

$$q = 1,2 + 0,05t_{гр} - 2,59v_{зс} - 0,0002t_{гр}^2 + 0,0002t_{гр}v_{зс} + 5,49v_{зс}^2 \quad (6)$$

где q - удельные затраты энергии на испарение влаги, кДж/кг; $v_{зс}$ - скорость движения зерна по поверхности вибрационного транспортирующего рабочего органа, м/с; $t_{гр}$ - температура греющей поверхности вибрационного транспортирующего рабочего органа, °C.

Уравнение (6) в кодированных значениях основных независимых факторов процесса сушки имеет следующий вид:

$$Y = 4,502 + 0,564x - 0,0575y - 0,492x^2 + 0,0001xy + 0,063y^2, \quad (7)$$

где Y - удельные затраты энергии на испарение влаги, кДж/(кг влаги); x - температура греющей поверхности, °C; y - скорость движения зерна, м/с.

Графическое изображение поверхности отклика, характеризующей взаимосвязь суммарных энергозатрат от исследуемых факторов, приведено на рисунке 4.

В результате проведённых экспериментальных исследований определены оптимальные значения выбранных независимых факторов, которые оказывают наибольшее влияние на критерий оптимизации: $\tau = 8$ с, $v_{зс} = 0,22$ м/с и $t_{гр} = 132$ °C. При этом удельные затраты энергии на процесс сушки зерна составили 4,67 МДж/кг_{влаги}.

Выводы

Научно обоснованные параметры контактной зерносушилки с вибрационным транспортирующим рабочим органом позволяют на более качественном уровне обеспечить процесс послеуборочной сушки зерна при одновременном снижении удельных затрат энергии на процесс сушки зерна до 4,67 МДж/кг_{влаги}.

Использование предлагаемого средства механизации процесса сушки зерна позволяет

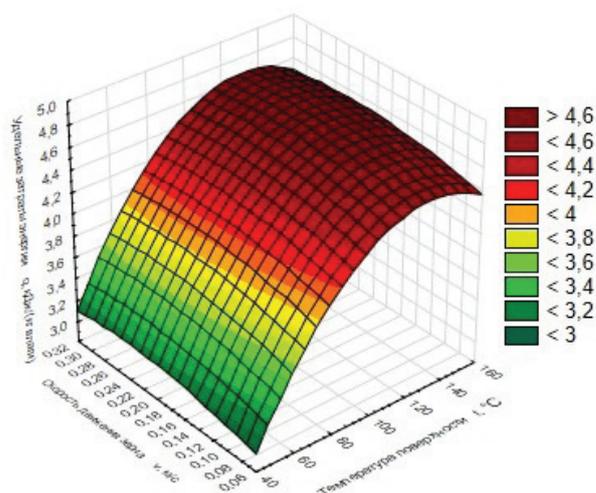


Рис. 4 – Графическая интерпретация уравнения (6)

повысить энергоэффективность этого процесса по сравнению с существующими техническими средствами в 1,26...1,56 раза.

Библиографический список

1. Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года. – Москва, 2017. – 34 с.
2. Курдюмов В.И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа // В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин: монография. – Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.
3. Пронин, В.М. Сравнительные испытания сельскохозяйственной техники. Научное издание. - М.: Росинформагротех, 2013. - 416 с.
4. Курдюмов, В.И. Энергозатраты на процесс сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин // Вестник ВИЭСХ. - М., 2012. – № 7. - С. 52-54.
5. Пат. 2620136 Российская Федерация, МПК F26B 17/26. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин, П.С. Агеев; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА. - Заявл. 24.02.2016; опубл. 23.05.2017 г. Бюл. № 15.
6. Пат. 168723 Российская Федерация, МПК F26B 17/24. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин, Г.В. Карпенко, П.С. Агеев; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА. - Заявл. 24.02.2016; опубл. 17.02.2017 г. Бюл. № 5.

JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF CONTACT SEED DRYER WITH A VIBRATIONAL TRANSPORTING WORKING BODY

Proshkin E.N., Kurdyumov V.I., Kanyayeva O.M.

Keywords: grain, motion, energy, parameters, construction

It is important to create agricultural machines that correspond to such essential parameters as energy and resource efficiency, utility, reliability and ergonomics. It was revealed that in the cycle of post-harvest operations the most energy-consuming and necessary is the process of grain drying.

Existing commercial grain dryers have significant drawbacks, which leads to their inappropriate use in agrarian grain processing farms of Russia. Ulyanovsk State Agrarian University has a rich experience in providing high-quality technical support for moisture removal from grain based on the use of contact grain dryers. An important element of the contact grain dryers being developed is a transporting working element that must ensure the uniformity of the grain being delivered from the charge hopper to the discharge window of the grain dryer, herewith, it is important that the grain is moved in a layer, thickness of which, is slightly higher than the maximum parameters of a single grain of the crop subjected to drying. Moreover, it is necessary to ensure a thorough supply of heat from the surface of the transporting working element to the grain. The aim of the research was the scientific substantiation of parameters of the vibrating transporting working element of the contact grain dryer. At the same time, for the development and scientific justification of the appropriate design parameters of the transporting working element of vibrating type, it is necessary to take into account the integral effect of both structural and regime factors that affect the uniformity and energy-efficiency of grain drying. As a result of the conducted experimental studies, the appropriate values of the selected independent factors, which have the greatest influence on the improvement criterion, have been determined: $\tau = 8$ s, $v_{sc} = 0,22$ m/s and $t_{an} = 132$ C. Herewith, specific energy consumption for the process of grain drying was $4,67$ MJ/kg_{moisture}.

Bibliography

1. Strategy of agricultural machinery development in Russia for the period until 2030. - Moscow, 2017. - 34 p.
2. Kurdyumov, V.I. Thermal treatment of grain in devices of contact type // V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, G.V. Karpenko, S.A. Sutyagin: a monograph. - Ulyanovsk: USAA named after P.A. Stolypin, 2013. - 290 p.
3. Pronin, V.M. Comparative testing of agricultural machinery. Scientific publication. - Moscow: Rosinformagrotekh, 2013. - 416 p.
4. Kurdyumov, V.I. Energy costs for grain drying / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin // Vestnik ARIEA. - M., 2012. - № 7. - P. 52-54.
5. Pat. 2620136 Russian Federation, IPC F26B 17/26. Device for grain drying / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin, P.S. Ageyev; applicant and patent owner FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural Academy. - appl. 24.02.2016; publ. 23.05.2017. Bul. № 15.
6. Pat. 168723 Russian Federation, IPC F26B 17/24. Device for grain drying / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin, G.V. Karpenko, P.S. Ageyev; applicant and patent owner FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural Academy. - appl. 24.02.2016; publ. 17.02.2017. Bul. № 5.