

## К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ФЕРМЕРСКОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ

**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», заслуженный изобретатель РФ

**Павлушин Андрей Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

ФГБОУ ВО Ульяновская ГСХА

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, дом 1; тел.: 89050359200;

e-mail: andrejpavlu@yandex.ru.

**Ключевые слова:** сушка зерна, энергосбережение, исследования, разработки.

Рассмотрена перспективность использования контактных фермерских зерносушилок. Обоснована структурная схема фермерской зерносушилки и элементы, входящие в её состав. Представлена функциональная последовательность построения и дальнейшей реализации математической модели процесса тепловой сушки зерна. Проведённые исследования разработанной зерносушилки подтвердили перспективность использования разработанной фермерской зерносушилки.

### Введение

Федеральная стратегия развития аграрного сектора в Российской Федерации до 2020 года одним из основных направлений предусматривает повышение эффективности технологического оснащения отечественных сельскохозяйственных предприятий малых форм собственности (фермерских хозяйств).

В настоящее время на территории России создано более 300 тыс. хозяйств подобного типа, производящих более 22 млн. т зерна. Следует отметить, что до 60 % обмолоченного зерна необходимо подвергать сушке, так как его влажность значительно превышает нормативные значения. При этом производство зерна будет рентабельным только в том случае, если зернопроизводящие предприятия будут использовать современную сельскохозяйственную технику, обладающую высокой энергоэффективностью [1, 2].

Широко представленные на рынке сельскохозяйственной техники для послеуборочной обработки зерна сушильные комплексы предназначены для переработки больших зерновых партий (производи-

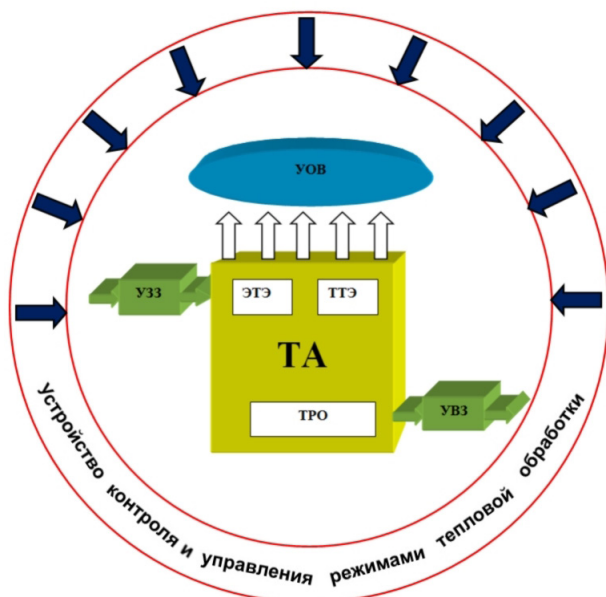
тельность зерносушилок достигает 100 т/ч). Эксплуатация этих комплексов в небольших зерноперерабатывающих предприятиях экономически неэффективна [3, 4].

Перспективным вектором развития средств механизации тепловой обработки зерна является создание минизерносушилок, характеризующихся относительно низкой энергоёмкостью, высокими экономическими показателями. При этом структурная схема разрабатываемых зерносушилок может быть представлена следующими основными элементами (рис. 1) [5, 6].

Таким образом, разработка инновационных зерносушилок, отвечающих сегодняшним запросам отечественной зернопроизводящей отрасли, является актуальной задачей.

### Объекты и методы исследований

Проанализировав и изучив современные методы и приёмы планирования, проведения экспериментальных исследований и обработки полученных данных с использованием статистических методов [7], нами был сделан вывод, что основной целью при составлении плана научных экспериментальных исследований должно стать полу-



**Рис. 1 - Структурная схема фермерской зерносушилки:**

*УОВ – устройство отвода влаги; УЗЗ – устройство загрузки зерна; ЭТЭ – электрический теплогенерирующий элемент; ТТЭ – теплопередающий и теплоотдающий элемент; ТА – теплообменный аппарат; ТРО – транспортирующий рабочий орган; УВЗ – устройство выгрузки зерна*

чение математической модели процесса тепловой сушки зерна в разработанном средстве механизации.

На рис. 2 представлена функциональная последовательность построения и дальнейшей реализации математической модели процесса тепловой сушки зерна, который служил объектом нашего исследования.

Для реализации программы исследований процесса сушки зерна нами был создан опытный образец фермерской зерносушилки (рис. 3) [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Конструкция разработанной фермерской зерносушилки позволяет проводить исследование тепловой сушки зерна при варьировании в значительных диапазонах основных режимных параметров: средней температуры греющей поверхности (40...300 °С), времени тепловой обработки зерна (30...250 с), скорости движения воздуха в кожухе (0...10 м/с), а также температуры подаваемого воздуха (20...70 °С).

В качестве критерия оптимизации нами был принят показатель удельных за-

трат энергии на 1 кг испаренной влаги  $q_{уд}$ , кДж/кг.

На основе проведенных поисковых исследований и предварительных теоретических научных изысканий [14], а также, принимая во внимания требования к основным независимым факторам процесса (управляемость, однородность и отсутствие корреляции между ними) нами были выделены следующие режимные параметры:  $x_1 (t_{зр.ср.})$  – средняя температура греющей поверхности кожуха фермерской зерносушилки;  $x_2 (t)$  – время нахождения зерна в зерносушилке;  $x_3 (t_в)$  – температура воздуха, подаваемого в зерносушилку;  $x_4 (v_в)$  – скорость движения воздуха в зерносушилке.

Диапазоны варьирования факторов были выявлены на основе предварительно изученных ранее выполненных исследований по сушке зерна, поисковых опытов, а также с учетом требований к конструктивным параметрам фермерской зерносушилки.

Детальный анализ теоретических исследований [15] показал, что функцией, в полной мере, аппроксимирующей экспериментальные данные по изучению процесса тепловой обработки зерна вполне может быть квадратичное уравнение регрессии:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где  $y$  – параметр оптимизации;  $x_i (i = 1, 2, 3 \dots n)$  – значения факторов в кодированных единицах;  $b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Для получения более точных и достоверных данных проводили полнофакторный эксперимент. Надежность опытов оценивали по рекомендациям Адлера, Вентцеля, Мельникова с учётом требований ГОСТа 24026-80.

Полученные результаты по исследованию процесса сушки зерна в разработанной фермерской зерносушилке были систематизированы и комплексно обработаны при помощи существующих методов математической статистики, на основе специализированных лицензированных программных

продуктов для ПК. При этом все уравнения регрессии подвергали критериальной проверке на подтверждение достоверности и значимости полученных результатов исследований, а также адекватности полученных математических моделей.

#### Результаты исследований

Исследование фермерской зерносушилки проводили на зерне ячменя сорта «Раушан».

Результаты опытов интерпретировали квазиньютоновским методом при помощи модуля «Нелинейное оценивание» программного продукта Statistica 10.0. В итоге была получена зависимость вида

$$q_{y\phi} = 2620,086 - 57,973t_{cp,cp} + 78,523t_{\phi} + 1,546t_{cp,cp}^2 - 5,98v_{\phi}^2 + 0,825t_{\phi}^2 - 3,236t_{cp,cp}t_{\phi} + 0,112t_{cp,cp}\tau + 5,694v_{\phi}t_{\phi} + 0,832v_{\phi}\tau + 0,225t_{\phi}\tau, \quad (2)$$

где  $t_{cp,cp}$  – средняя температура греющей поверхности, °С;  $t$  – время нахождения зерна в зерносушилке, с;  $t_{\phi}$  – температура воздуха, подаваемого в сушильную камеру, °С;  $v_{\phi}$  – скорость движения воздуха, м/с.

Полученное уравнение (2) представляет собой неполное квадратичное уравнение, описывающее процесс сушки зерна в предлагаемом устройстве, так как коэффи-



Рис. 2 - Алгоритм построения математической модели процесса сушки зерна



Рис. 3 – Фрагмент технологической линии послеуборочной обработки зерна в условиях фермерского хозяйства: 1 – зерносушилка; 2 – блок для контроля и измерения основных параметров процесса; 3, 4 – погрузчики зерна

**Таблица**  
**Результаты критериальной проверки**  
**уравнений регрессии**

№ уравнения	Оцениваемый критерий		
	$R$	$F_p$	$F_T$
3	0,91	2,31	2,4
4	0,83	2,05	
5	0,77	2,24	
6	0,87	2,21	
7	0,82	2,09	
8	0,83	2,32	

циенты регрессии  $b_2, b_4, b_{44}, b_{12}$  статистически незначимы при уровне значимости  $p = 0,05$ . Корреляционное отношение  $r = 0,97$ , а коэффициент детерминации  $r^2 = 0,941$ , поэтому данное уравнение объясняет 94,1 % вариации зависимой переменной.

Остатки регрессии, полученные после оценивания, оказались одинаково распределенными случайными величинами с нулевым математическим ожиданием. Это установлено в модуле «основные статистики» по существенности нормального распределения на основании критерия Колмогорова-Смирнова, а также по гистограмме остатков.

Для определения степени воздействия основных независимых факторов процесса сушки зерна и их интегрированного воздействия на суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги из зерна был выполнен анализ с помощью модуля «Фиксированная нелинейная регрессия». После обработки экспериментальных данных были получены следующие уравнения регрессии.

1. Зависимость критерия оптимизации от суммарного влияния  $t_{зр.ср.}$  и  $v_в$ :

$$q_{yв} = -2099,4296 + 221,811t_{зр.ср.} + 264,3479v_в - 9912t_{зр.ср.}^2 - 6,1896t_{зр.ср.}v_в + 19,191v_в^2, \quad (3)$$

где  $q_{yв}$  – удельные затраты теплоты, кДж/кг<sub>влаги</sub>.

2. Зависимость критерия оптимизации от суммарного влияния  $t_{зр.ср.}$  и  $t_в$ :

$$q_{yв} = 520,9627 + 143,0636t_{зр.ср.} + 9,9137t_в - 1,3442t_{зр.ср.}^2 - 0,8524t_{зр.ср.}t_в + 0,9261t_в^2. \quad (4)$$

3. Зависимость критерия оптимизации от суммарного влияния  $t_{зр.ср.}$  и  $t$ :

$$q_{yв} = 2647,0664 - 12,7559t_{зр.ср.} + 6,7091t + 2,093t_{зр.ср.}^2 + 0,1893t_{зр.ср.}t - 0,0038t^2. \quad (5)$$

4. Зависимость критерия оптимизации от суммарного влияния  $v_в$  и  $t_в$ :

$$q_{yв} = 4404,3173 + 38,4843v_в - 80,1735t_в - 5,5899v_в^2 + 4,8581v_вт_в + 1,3298t_в^2. \quad (6)$$

5. Зависимость критерия оптимизации от суммарного влияния  $v_в$  и  $t$ :

$$q_{yв} = 3360,1864 - 191,6788v_в + 2,0787t + 21,3492v_в^2 + 1,2083v_вт + 0,0024t^2. \quad (7)$$

6. Зависимость критерия оптимизации от суммарного влияния  $t_в$  и  $t$ :

$$q_{yв} = 3108,6658 - 16,8636t_в + 3,0194t + 0,2686t_в^2 + 0,2478t_вт + 0,0124t^2. \quad (8)$$

В таблице представлены результаты критериальной проверки полученных уравнений регрессии.

Проверка показала, что результаты исследования достоверны, а расчёты выполнены с требуемой точностью. Математические модели, описывающие процесс сушки зерна, оказались статистически значимы.

На основе анализа полученных регрессионных моделей нами были выявлены оптимальные значения режимных факторов, при которых удельные затраты теплоты на испарение влаги из зерна  $q_{уд.опт}$  минимальны и составляют 3,9 МДж/кг<sub>влаги</sub>. Такие энергозатраты достигаются при следующих значениях режимных параметров:  $t_{зр.ср.опт} = 53,1$  °С,  $t_{опт} = 88$  с,  $v_{в.опт} = 1,7$  м/с,  $t_{в.опт} = 23,6$  °С. Производительность фермерской зерносушилки, при работе на экспериментальных обоснованных параметрах составляет 0,4 т/ч, что полностью удовлетворяет технологическим потребностям небольшого фермерского хозяйства.

### Выводы

Проведённые исследования подтвердили перспективность использования разработанной фермерской зерносушилки.

Эксплуатация зерносушилки на экспериментально обоснованных параметрах позволяет снизить энергоёмкость процесса в 1,8...2 раза по сравнению с аналогичным показателем серийно выпускаемых зерносушильных установок. Это позволяет сэкономить до 251 рубля на 1 т продукции.

Созданная зерносушилка может быть рекомендована для её рентабельного использования при сушке зерна в малых сельскохозяйственных предприятиях.

### Библиографический список

1. Генералов, И.Г. Переработка зерна, как один из путей повышения конкурентоспособности сельскохозяйственных организаций / И.Г. Генералов, Н.А. Смирнов // Вестник НГИЭИ. - № 1 (44). - 2015. - С. 10-18.
2. Генералов, И.Г., Суслов С.А. Экстенсивные и интенсивные факторы развития зерновой подотрасли / И.Г. Генералов, С.А. Суслов // Вестник НГИЭИ. - 2015. - №11 (54). - С. 21-32.
3. Данилов, Д.Ю. Повышение эффективности сушки зерна: основные технологические приемы и направления / Д.Ю. Данилов, А.Ю. Рындин // Вестник НГИЭИ. - 2015. - №8 (51). - С. 26-30.
4. Сергеева Е.Ю., Новикова Г.В. Дезинтегратор с СВЧ-генераторами для микронизации зерна // Вестник НГИЭИ. 2015. №2 (45). С. 17-20.
5. Совершенствование средств механизации переработки птичьего помета / В.И. Курдюмов, Н.Н. Аксенова, А.А. Павлушин, Е.В. Спирина // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения». – Ульяновск: ГСХА, 2012. - Т. II. – С. 80-84.
6. Обоснование теплофизических параметров установки для сушки зерна контактного типа / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин, М.А. Карпенко // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научное обеспечение устойчивого функционирования и развития АПК». - Уфа: ФГОУ ВПО «Башкирский ГАУ», 2009, Часть I. – С. 84-87.
7. Тепловая обработка зерна при подготовке комбикорма для поросят / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. - 2012. - № 3. - С. 102-107.
8. Пат. 90970 Российская Федерация, МПК А23В9/08. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 07.10.2009; опубл. 27.01.2010 г. Бюл. № 3.
9. Пат. 2428642 Российская Федерация, МПК F26B11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 14.04.2010; опубл. 10.09.2011 г. Бюл. № 25.
10. Пат. 2411432 Российская Федерация, МПК F26B17/04. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 07.10.2009; опубл. 10.02.2011 г. Бюл. № 4.
11. Пат. 2453123 Российская Федерация, МПК А23В9/08. Устройство для сушки пищевых продуктов / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 10.11.2010; опубл. 20.06.2012 г. Бюл. № 17.
12. Пат. 96639 Российская Федерация, МПК F26B3/00. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.А. Постников; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 24.02.2010; опубл. 10.08.2010 г. Бюл. № 22.
13. Пат. 119862 Российская Федерация, МПК F26B11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 11.01.2012; опубл. 27.08.2012 г. Бюл. № 24.
14. 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.
15. Курдюмов, В.И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин. – Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.