

Также выявлено, что при температуре 25<sup>0</sup>С свойства зерен пшеницы всхожестью 97 и 87% становятся идентичными. Контроль всхожести зерен пшеницы по мембранному потенциалу при температуре свыше 25<sup>0</sup>С не дает достоверных результатов.

Проведенные эксперименты с точки зрения мембранного потенциала научно обосновывают регламентируемый ГОСТом диапазон температур проращивания зерен пшеницы от 20 до 22<sup>0</sup>С. Именно в этом диапазоне температур наблюдается существенная разница значения мембранного потенциала в зависимости от всхожести зерен пшеницы.

Однако время исследования всхожести зерен пшеницы по методу, изложенному в ГОСТ, составляет 10-12 дней, в разработанном методе контроля всхожести время на подготовку зерен пшеницы сокращено до 12 ч.

#### Библиографический список

1. Рубин А.Б. Биофизика: в 2 т. Т. 1. Теоретическая биофизика. – 2-е изд., исправл. и доп. – М.: Университет, 1999. – 448 с.
2. Шереметьев М.В., Зырянов А.А., Мерченко Н.Н., Зрюмова А.Г., Пронин С.П. Экспериментальная установка для исследования потенциала действия зерен пшеницы // Ползуновский альманах. – 2011. – № 1. – С. 177-178.
3. Пронин С.П., Зрюмова А.Г., Мерченко Н.Н. Исследование изменения потенциала действия семян пшеницы в зависимости от их всхожести при заданной температуре // Ползуновский альманах. – 2011. – № 1. – С. 170-172.
4. ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести.



УДК 631:362.7

**В.И. Курдюмов,  
А.А. Павлушин,  
Г.В. Карпенко,  
М.А. Карпенко**

## РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТАКТНОЙ СУШКИ ЗЕРНА РАЗЛИЧНЫХ КУЛЬТУР ПРИ ТОНКОСЛОЙНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ВЫСУШИВАЕМОГО МАТЕРИАЛА

**Ключевые слова:** сушка зерна, энергосбережение, контактный способ передачи теплоты, методика исследований, единственный зерновой слой, оптимизация процесса зерносушения.

#### Введение

Согласно Государственной программе развития сельского хозяйства на 2013-2020 гг., одним из приоритетных направлений является развитие малых форм хозяйствования – крестьянских (фермерских) хозяйств [1].

Кроме того, Правительством Российской Федерации принят ряд правовых актов, направленных на повышение энергоэффективности производства валового внутреннего продукта страны к 2020 г. не менее чем на 40%.

В нашей стране уже функционируют свыше 300 тыс. крестьянских (фермерских) хозяйств, валовый сбор зерна в которых достигает 3,5·10<sup>6</sup> т. Однако обеспечение требуемого уровня рентабельности произ-

водства зерна сельскохозяйственными предприятиями подобного типа возможно лишь при использовании энергоэффективных установок для послеуборочной обработки зерна.

Одна из наиболее энергозатратных операций в цикле послеуборочной обработки зерна – его сушка. Примерно 20% от всего потребления энергии в агропромышленном комплексе развитых стран приходится на этот процесс.

Следует отметить, что на протяжении всей истории развития зерносушилок требовалось создавать установки большой производительности, в которых использовался конвективный способ подвода теплоты. Применение же контактного способа нагрева зерна не обеспечивало приемлемых энергетических показателей. Однако эксплуатация существующих высокопроизводительных зерносушилок конвективного типа экономически неэффективна в условиях фермерских хозяйств.

Создание новых огневых мини-зерносушилок является малорациональным направлением развития зерносушильной техники из-за невозможности организовать на низкопотенциальном уровне тепловые конвекционные процессы. Эффективным направлением развития в этом случае является использование в мини-зерносушилках контактного способа нагрева тонкого слоя продукта, причем этот нагрев рационально осуществлять с помощью электрических нагревательных элементов. Возможность эффективного использования контактного способа передачи теплоты для нагрева зерна при его сушке подтверждена многочисленными исследованиями как отечественными, так и зарубежными учёными [2, 3].

Таким образом, создание современных средств механизации сушки зерна и их адаптация к условиям реального сельскохозяйственного производства в России являются актуальной и важной научно-технической проблемой.

**Целью проводимых исследований** является повышение энергетической эффективности универсальных мини-зерносушилок на основе применения контактного способа теплопередачи при тонкослойном движении высушиваемого продукта.

В работе поставлены следующие **задачи исследования:**

- разработать устройство для сушки зерна;
- определить оптимальные режимные параметры работы устройства при сушке зерна различных культур в лабораторных и производственных условиях;
- оценить эффективность предлагаемого устройства для сушки зерна при выбранных режимах.

### Объекты и методы исследований

Объектом исследований являлся технологический процесс сушки зерна. Для решения поставленных задач применяли дифференциальное и интегральное исчисления; численные методы; методы математической статистики, корреляционно-регрессионного анализа. Теоретические исследования подтверждены экспериментальной проверкой в лабораторных и производственных условиях. Достоверность полученных данных обеспечена применением методов математической обработки и статистического анализа результатов исследований, планирования эксперимента и многофакторного анализа, пакетов математических программ для ПЭВМ: «Statistica-10», «MathCAD-14» и «Derive-6».

### Экспериментальная часть

Конструкция разрабатываемого устройства для сушки зерна (УСЗ) должна, прежде всего, обеспечить равномерный нагрев и сушку зерна при обеспечении постоянного входного и выходного контроля его температуры и влажности. УСЗ должно иметь необходимую пропускную способность, возможно меньшую металлоемкость, но при этом должно быть экономичным по удельным расходам теплоты. Добиться снижения энергоемкости УСЗ можно при помощи совмещения процессов нагрева и транспортирования единичного слоя зерна на основе использования соответствующих рабочих органов. При этом обеспечивается непрерывность процесса сушки и равномерность нагрева обрабатываемого зерна.

Для реализации указанных целей нами было разработано и изготовлено лабораторное УСЗ (рис. 1) [4].

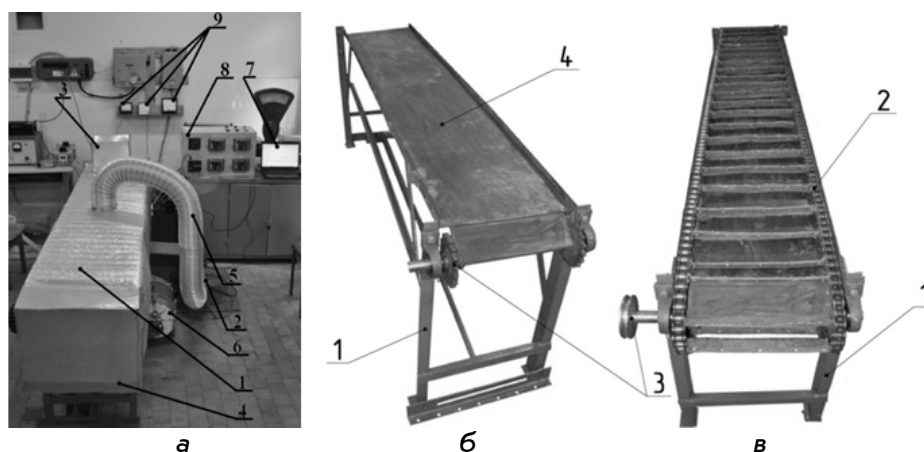


Рис. 1. Устройство для сушки зерна:

- а – проведение лабораторных исследований: 1 – кожух; 2 – электрокалорифер; 3 – загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – воздуховод; 6 – электродвигатель; 7 – персональный компьютер; 8 – блок автоматического управления температурным режимом; 9 – контрольно-измерительная аппаратура; б, в – элементы конструкции УСЗ: 1 – рама; 2 – цепь со скребками; 3 – привод; 4 – греющая пластина

Созданное УСЗ позволяет исследовать процесс сушки зерна при изменении в широких пределах основных режимных параметров: средней температуры греющей поверхности (20-250°C), скорости движения зерна по греющей поверхности (0,01-0,13 м/с), скорости движения воздуха в кожухе (0-10 м/с), температуры подаваемого в сушильную камеру воздуха (20-70°C).

Для обоснования распределения температуры по греющей пластине УСЗ и физической сущности процесса сушки зерна в разработанном устройстве необходимо решить дифференциальное уравнение теплопроводности, которое непосредственно характеризует протекание указанного физического явления в любой точке высушиваемого материала в любой момент времени.

При этом нагрев зерна можно рассматривать как процесс передачи теплоты посредством теплопроводности. Интерпретировать данный процесс можно следующей зависимостью:

$$\frac{\partial u}{\partial \phi} = a \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где  $u = [t_{(z,\phi)} - t_n]$  – разность между переменной температурой зерна  $t_{(z,\tau)}$  и температурой греющей поверхности  $t_n$ ;

$\tau$  – время сушки, с;

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$z$  – толщина высушиваемого зернового слоя, м.

Решение уравнения (1) имеет вид [5]:

$$\frac{du_{(z,\phi)}}{dz} = \frac{a_m}{\lambda} (t_n - t_0) \exp \left[ \frac{a_m}{\lambda} \left( z + \frac{a_m}{\lambda} \right) \right] \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{a\phi}} + \frac{a_m}{\lambda} \sqrt{a\phi} \right) \right], \quad (2)$$

где  $a$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);

$t_0$  – температура зерна на входе в сушильную камеру, °C.

Следовательно, зная закономерности распределения температуры по греющей поверхности при тонкослойном движении высушиваемого зерна, можно достичь, регулируя режимные параметры, заданной температуры нагрева зерна, тем самым повысить качество сушки в разработанном УСЗ.

Планирование эксперимента заключалось в выборе определённой стратегии выполнения опытов, которая позволила заранее определить схему пошагового проведения

эксперимента, включить в него минимальное число опытов при одновременном варьировании всеми факторами без снижения количества и качества полученной информации. Задачей этого планирования являлось получение математической модели объекта исследования в виде полинома (уравнения регрессии).

На основе метода формализации априорной информации, а также с учетом требований к действующим факторам (управляемость, однородность и отсутствие корреляции между ними) нами были выделены факторы, которые оказывают наибольшее влияние на процесс сушки зерна в разработанном УСЗ:  $x_1$  ( $t_{гр.ср.}$ ) – средняя температура греющей поверхности;

$x_2$  ( $\tau$ ) – время нахождения зерна в устройстве;

$x_3$  ( $v_B$ ) – скорость движения воздуха в устройстве;

$x_4$  ( $t_B$ ) – температура воздуха, подаваемого в устройство [6, 7].

Для сокращения количества опытов при выборе оптимального сочетания переменных факторов, влияющих на процесс сушки зерна, применяли критерий оптимизации – удельные затраты энергии на 1 кг испаренной влаги  $q$ , МДж/кг, представляющий собой отношение расходуемой на сушку теплоты  $Q$ , МДж, к массе испаренной влаги  $m$ , кг. Этот критерий обладает достаточной универсальностью и позволяет сравнивать между собой устройства для сушки зерна различных типов [8].

Определение пределов варьирования основных независимых факторов процесса сушки зерна в разработанном УСЗ выполняли на основании ранее проведенных исследований, результатов поисковых экспериментов, а также исходя из конструктивных соображений. Так, при проведении исследований были приняты следующие пределы варьирования независимых факторов: средняя температура греющей поверхности – 40-90°C, время нахождения зерна в устройстве (экспозиция) – 20-55 с, скорость движения воздуха – 0-6 м/с, температура воздуха – 30-50°C. Исходная влажность зерна при проведении исследований составляла 20-25%.

В ходе проведения опытов, выполненных в соответствии с планом эксперимента, были получены необходимые данные для составления математических моделей процессов сушки зерна в разработанном устройстве.

В частности, для процесса сушки зерна пшеницы были получены уравнения регрессий в натуральных значениях факторов, характеризующие влияние каждого из независимых факторов на критерий оптимизации процесса сушки зерна:

$$q = 4100,73 - 287,88v_{\text{в}} - 10,8t_{\text{в}} + 2v_{\text{в}}^2 + 10,28v_{\text{в}}t_{\text{в}} + 0,22t_{\text{в}}^2; \quad (3)$$

$$q = 3648,93 + 4,52t_{\text{гр.ср.}} + 12,04v_{\text{в}} - 0,03t_{\text{гр.ср.}}^2 - 0,47t_{\text{гр.ср.}}v_{\text{в}} + 32,35v_{\text{в}}^2; \quad (4)$$

$$q = 3070,23 + 8,71t_{\text{гр.ср.}} + 36,28t - 0,03t_{\text{гр.ср.}}^2 - 0,16t_{\text{гр.ср.}}t - 0,11t^2 \quad (5)$$

где  $q$  – суммарные удельные энергозатраты на процесс испарения влаги из зерна, МДж/кг;

$v_{\text{в}}$  – скорость движения воздуха в УСЗ, м/с;

$t_{\text{в}}$  – температура подаваемого в УСЗ воздуха, °С;

$t_{\text{гр.ср.}}$  – средняя температура нагрева кожуха УСЗ, °С;

$t$  – экспозиция сушки, с.

Таблица

Сравнительная характеристика оптимальных режимных показателей при сушке различных культур в УСЗ

Показатели	Высушиваемая культура		
	овёс	рожь	пшеница
Средняя температура греющей поверхности, °С	69	94	87
Скорость движения зерна, м/с	0,05	0,045	0,045
Скорость движения воздуха, м/с	1,33	1,33	1,33
Температура подаваемого воздуха, °С	23,8	23,4	23,6
Средний разовый влагосъём, %	2,85	2,75	2,77
Суммарные удельные затраты энергии на процесс испарения влаги из зерна, МДж/кг	3,7	3,86	3,82
Пропускная способность установки, кг/ч	305	375	400
Экспозиция сушки, с	40	45	45

Аналогично были получены математические модели процессов сушки зерна ржи и овса. Для каждой из полученных математических моделей было определено корреляционное отношение и выполнена проверка с помощью критериев Стьюдента, Фишера, Кохрена.

Анализ расчетных значений критериев и сравнение их с табличными значениями подтвердил адекватность полученных математических моделей, значимость их коэффициентов и достоверность проведённых экспериментов.

Результаты, полученные при лабораторных исследованиях сушки зерна в УСЗ, представлены в таблице.

Как видно из полученных данных, энергозатраты на процесс сушки зерна зависят от вида высушиваемой культуры. Так, максимум энергозатрат приходится на рожь, это связано, прежде всего, с тем, что рожь содержит больше водорастворимых веществ. Белковый комплекс у нее более устойчив, к тому же рожь содержит большое количество слизи. Поэтому зерно ржи выдерживает более высокую температуру нагрева.

В результате производственной апробации подтвердилась работоспособность разработанного УСЗ при сушке зерна различных культур, отказы и поломки отсутствовали (рис. 2). Также было выявлено соответствие высушенного зерна требованиям Государственного стандарта [9].



Рис. 2. Фрагмент технологической линии подработки зерна:  
1 – УСЗ; 2 – контрольно-измерительная аппаратура; 3 – погрузчик зерна со спирально-винтовым рабочим органом

Технико-экономический анализ предлагаемого УСЗ в сравнении с серийно выпускаемой зерносушилкой СЗШ-0,5 показал, что предлагаемое устройство имеет в 4,8 раза меньшую энергоёмкость и значительно меньшую металлоёмкость. Годовая экономия составила 248380,2 руб., экономический эффект – 404,54 руб/т продукции, при этом срок окупаемости УСЗ не превысил 0,3 года.

### Выводы

В результате проведённых исследований выявлено, что в сложившихся экономических условиях для сельскохозяйственных предприятий наиболее перспективными и



экономичными являются устройства относительно небольшой пропускной способности, основанные на применении контактного способа передачи теплоты зерну. При этом конструкция устройства должна, прежде всего, обеспечить равномерный нагрев и сушку продукта при надежном контроле его температуры и влажности.

Добиться снижения энергоемкости устройств можно при помощи совмещения процессов нагрева и транспортирования единичного слоя зерна на основе использования соответствующих рабочих органов. При этом обеспечиваются непрерывность процесса сушки и равномерность нагрева обрабатываемого зерна.

Разработанное устройство для сушки зерна позволяет на высоком технологическом уровне сушить зерно различных культур без снижения качества готового продукта. Производственные исследования разработанного универсального устройства показали высокую эффективность при применении его в процессах сушки зерна различных культур. Расхождения значений основных показателей процесса сушки зерна, полученных в производственных и лабораторных условиях, не превысили 4,7%, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов.

Предложенное устройство может быть рекомендовано к использованию небольшими сельскохозяйственными и перерабатывающими предприятиями, фермерскими хозяйствами для сушки зерна различных культур.

#### Библиографический список

1. Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы. – М.: МСХ РФ, 2012. – 204 с.
2. Данилов О.Л., Леончик Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 133 с.
3. Красников В.В. Кондуктивная сушка. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
4. Патент RU № 2436630. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; опубл. 20.12.2011; Бюл. № 35.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.
6. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1969. – 157 с.
7. Курдюмов В.И. Разработка и исследование машин для механизации животноводства и их рабочих органов. – Ульяновск, 2002. – 159 с.
8. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. – М.: Колос, 2004. – 240 с.
9. ГОСТ 10968-88. Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности прорастания. – М.: Изд-во Минхлебопродуктов СССР, 1988. – 3 с.

*Работа выполняется в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2516.2012.8.*



УДК 631.363

**А.А. Наймушин**

### МОДЕЛЬ РАЗМОЛА ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ЕГО МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ

**Ключевые слова:** модель размола зерна, молекулярное строение, измельчение, энергия связи, крахмальные гранулы.

#### Введение

Изучению прочности и механического разрушения зернового материала посвящено множество оригинальных работ, в которых основной акцент сделан на теорию прочности зерна и механизм его разрушения (кинетика разрыва молекулярных связей

при упругопластичных деформациях, образование и рост трещин, релаксация напряжений и т.д.) [1].

В настоящее время научились связывать технологические свойства зерна с его биологическим строением: все операции над зерном сводятся к его разделению на составные части. Именно поэтому большой интерес представляет изучение анатомического строения зерна с применением современных электронных микроскопов сканирующего типа.