

Его парадоксальность заключается в том, что эффективный коэффициент трения движения f_{δ}^* не зависит от параметров вибрации, а зависит всецело от угла наклона лотка α (рис. 3).

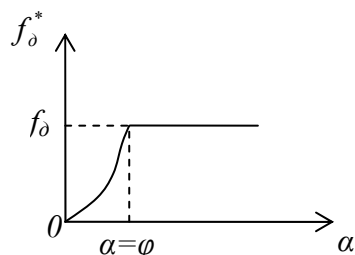


Рис. 3. Зависимость f_{δ}^* от угла α

Объясняется это следующим. При увеличении, к примеру, параметров вибрации A и ω увеличивается средняя скорость V сползания частицы. А в результате соотношение $Sh = V / (A\omega)$ остается постоянным [2]. Параметр Sh является, таким образом, адиабатическим инвариантом.

При этом, как видно из формулы (11), величина f_{δ}^* действительно остается постоянной. Изменить значение f_{δ}^* можно только посредством вариации угла α наклона лотка (рис. 2). Величина f_{δ} монотонно изменяется от $\alpha = 0$ до $\alpha = \varphi$. Имеем, таким образом, вязкую характеристику f_{δ}^* по отношению к углу наклона лотка α . При $\alpha \geq \varphi$ движение частицы возможно и без вибрации, которая не играет для этого режима какой-либо особой роли. Поэтому эффективный коэф-

фициент трения f_{δ}^* превращается в обычный коэффициент трения f_{δ} .

Подобные механизмы преобразования сухого трения при вибрациях имеют место не только в зоне взаимодействия материала с лотком (внешнее трение), но и при взаимодействии частиц материала друг с другом (внутреннее трение) [3].

Выводы

1. Эффективное уменьшение коэффициента трения возможно не только при вибрациях, но и при действии других факторов, в частности наклоне лотка в дозаторах сыпучих кормов.

2. Вибрирующий лоток дает уникальные возможности управления динамикой частиц не только посредством изменения параметров вибрации, но и наклона лотка. Особенно важно это для дозаторов кормов, для плавного регулирования их подачи, а также повышения эффективности самого процесса дозирования [3].

Библиографический список

1. Блехман И.И. Вибрационная механика / И.И. Блехман. — М.: Физматлит, 1994. — 400 с.
2. Федоренко И.Я. Вибрируемый зернистый слой в сельскохозяйственной технологии / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков. — Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. — 166 с.
3. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. / ред. совет В.Н. Челомей (председ.). — М.: Машиностроение, 1981.



УДК 631:362.7

**В.И. Курдюмов,
А.А. Павлушин,
К.В. Шлёнкин**

РЕЗУЛЬТАТЫ СУШКИ ЗЕРНА РЖИ В УСТАНОВКЕ КОНТАКТНОГО ТИПА

Ключевые слова: тепловая обработка зерна, термическое обеззараживание, установка контактного типа, энергосбережение, нагревательные элементы, теоретические исследования, шнековый транспортирующий рабочий орган, тем-

пература поверхности кожуха, режимные параметры, пропускная способность.

Сушка зерна с использованием научно обоснованных режимов повышает его

стойкость при хранении, улучшает семенные качества, а в отдельных случаях улучшает технологические свойства дефектного зерна. В нашей стране созданы крупные зерноприёмные и зерноперерабатывающие предприятия с поточной организацией производства, оснащённые высокопроизводительным зерносушильным технологическим оборудованием, производственная мощность которых превышает 10^5 т зерна в час.

Вместе с тем сегодня в сельскохозяйственном производстве получили развитие мелкотоварные хозяйства (фермерские, крестьянские), хозяйства населения. Доля этих хозяйств достигает 45% от общего количества.

В настоящее время в стране сложилась ситуация, при которой зерно сосредоточено у собственника-производителя, а техническая база по его обработке – у другого собственника крупных зерноприёмных и зерноперерабатывающих предприятий.

Сложившиеся, крайне не выгодные, производственные условия заставляют производителя торговать сырьём. На сегодняшний день создание малогабаритной, мобильной техники для организации первичной обработки и переработки зерна у его производителя – ближайший и наиболее экономичный резерв развития предприятий. Проблема дальнейшего наращивания производства продовольствия и кормов в условиях резкого удорожания энергетических ресурсов и ужесточения санитарных требований к пищевым продуктам требует изыскания и освоения новых ресурсосберегающих, экологически безопасных технологий, широкого вовлечения в энергетический баланс возобновляемых источников энергии.

В связи с этим разработка технологий и технических средств, интенсифицирующих процессы сушки зерна с учётом энергосбережения, является актуальной и важной научно-технической задачей.

Целью экспериментальных исследований является определение оптимальных параметров устройства для сушки зерна, предназначенного для применения в условиях небольших зерноперерабатывающих и фермерских хозяйств, которое позволит повысить эффективность сушки зерна с высоким качеством получаемого продукта и минимальными затратами энергии на процесс при поддержании заданной пропускной способности.

Объектом исследования являлся технологический процесс сушки зерна ржи, а предметом исследования – параметры технологического процесса сушки зерна ржи и средства механизации этого процесса.

Для реализации плана эксперимента разработана и создана лабораторная установка для сушки зерна со шнековым транспортирующим рабочим органом (рис. 1) [1-3]. Установка включает в себя теплообменник 1, представляющий собой цилиндрический кожух, состоящий из оснащенных электронагревателями трёх участков, разделённых между собой, а также шнековый транспортирующий рабочий орган и вентилятор 2 с воздуховодом 11.

Установка позволяет исследовать процесс сушки при различных температурах греющей поверхности, частотах вращения шнека, продолжительности контакта материала с греющей поверхностью, без обдува и с обдувом материала воздухом при различных скоростях его движения. При этом параметры процесса сушки контролировали с помощью комплекта измерительных приборов 10.

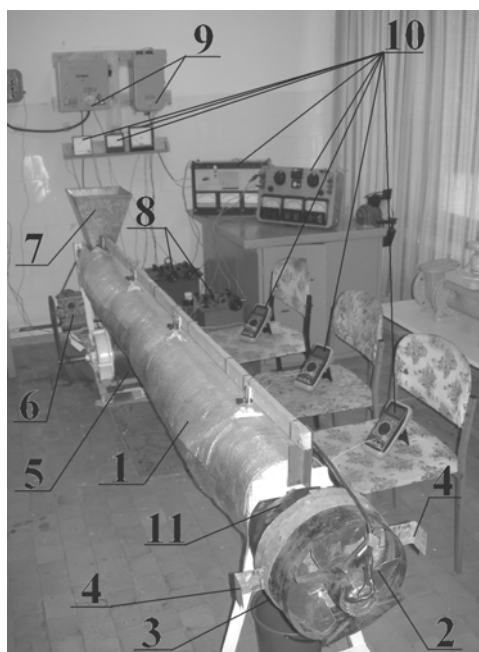


Рис. 1. Лабораторная установка для сушки зерна:
 1 – теплообменник; 2 – вентилятор;
 3 – выгрузное окно; 4 – заслонки;
 5 – электродвигатель;
 6 – редуктор червячный;
 7 – загрузочный бункер;
 8 – автотрансформаторы;
 9 – пускозащитная аппаратура;
 10 – комплект измерительных приборов;
 11 – воздуховод

Греющая поверхность установки расположена горизонтально и имеет форму полого цилиндра. Электрический нагревательный элемент позволяет регулировать температуру поверхности от 20° до 300°С. Измеряют температуру греющей поверхности и проверяют перед началом опыта равномерность температурного поля на каждом из участков кожуха с помощью установленных в нем термодатчиков. Заданную температуру поддерживают регуляторами 8.

Транспортирующий рабочий орган выполнен в форме перфорированного шнека. Его привод осуществляется от электродвигателя постоянного тока 5 (рис. 1) через червячный редуктор 6 с возможностью плавного изменения частоты вращения шнека.

Приспособление для удаления паров влаги состоит из центробежного вентилятора 2, соединенного с кожухом воздухопровода 11. Объем отсасываемого воздуха регулируют изменением положения шиберных заслонок 4.

Созданная экспериментальная установка позволяет проводить исследования в широких пределах изменения следующих основных режимных параметров: частота вращения электродвигателя менялась от 13,3 до 43,3 с⁻¹ изменением напряжения, подаваемого на двигатель постоянного тока от 32 до 220 В. При этом скорость движения семян находилась в пределах 0,007-0,034 м/с; мощность электродвигателя

привода шнека изменялась от 0,09 до 0,6 кВт. Суммарная мощность нагревательных элементов в зависимости от требуемой температуры греющей поверхности изменялась от 0,11 до 1,2 кВт, мощность электродвигателя вентилятора на разных режимах работы практически не изменялась и составляла 0,16 кВт.

В процессе поисковых опытов было выявлено отсутствие положительного эффекта при сушке с малой скоростью движения зерна в установке (менее 0,007 м/с) и высокой температурой греющей поверхности без удаления паров влаги из зоны сушки. В этом случае наблюдали резкое возрастание удельных затрат теплоты на испарение влаги, которые превышали 7000 кДж/кг, а зерно нагревалось сверх допустимых значений, что приводило к потере его всхожести. Также при скорости движения зерна в зерносушилке более 0,034 м/с влажесъем составлял менее 1%, что энергетически и экономически нецелесообразно.

В ходе проведения опытов, выполненных в соответствии с планом эксперимента, получены необходимые данные для составления математической модели процесса сушки зерна в установке контактного типа.

После обработки результатов опытов, проведенных на зерне ржи сорта «Саратовская-5», были получены следующие уравнения регрессии в натуральных значениях факторов для случаев:

$$1) v_3 = 0: q = 4184,48 + 271,36v_6 - 39,95t_n - 21,02v_6^2 - 1,06v_6t_n + 0,3t_n^2;$$

$$2) v_6 = 0: q = 3737,57 + 243,34v_3 - 26,28t_n + 22,51v_3^2 - 5,79v_3t_n + 0,29t_n^2;$$

$$3) t_n = 0: q = 2857,51 - 75,303v_6 + 232,3v_3 + 22,51v_6^2 - 8,24v_6v_3 - 21,02v_3^2,$$

где v_3 – скорость движения зерна ржи, м/с;

q – удельные затраты энергии на испарение влаги, кДж/кг;

v_6 – скорость движения воздуха, м/с;

t_n – средняя температура греющей поверхности, °С.

В кодированных значениях факторов полученные уравнения соответственно имеют вид:

$$4) Y = 335290 + 181,43x_2 - 80,91x_3 - 305,28x_2^2 - 40,39x_2x_3 + 27,06x_3^2;$$

$$5) Y = 3247,98 - 109,22x_1 + 96,18x_3 + 23,23x_1^2 - 57,88x_1x_3 + 27,06x_3^2;$$

$$6) Y = 3446,5 - 111,85x_1 + 273,89x_2 + 23,23x_1^2 - 30,82x_1x_2 - 305,28x_2^2,$$

где Y – удельные затраты энергии на испарение влаги, кДж/кг;

x_1, x_2, x_3 – соответственно, скорость движения зерна, скорость воздуха; средняя температура греющей поверхности в кодированных значениях факторов.

Анализ полученных графических поверхностей отклика от влияния основных режимных факторов на процесс сушки зерна (рис. 2) с помощью двумерных сечений (рис. 3) позволил получить оптимальный режим сушки зерна ржи: средняя температура греющей поверхности $t_{п\text{ опт}} = 61^{\circ}\text{C}$, скорость движения воздуха в установке $v_{в\text{ опт}} = 5,44\text{ м/с}$, скорость движения зерна $v_{з\text{ опт}} = 0,033\text{ м/с}$. При этом удельные затраты энергии на испарение влаги составляют $q_{\text{ опт}} = 3164\text{ кДж/кг}$, что ниже, чем у существующих аналогов, в 1,5 раза. Пропускная способность предложенной установки достигает 500 кг/ч при разовом влагосъёме до 4%.

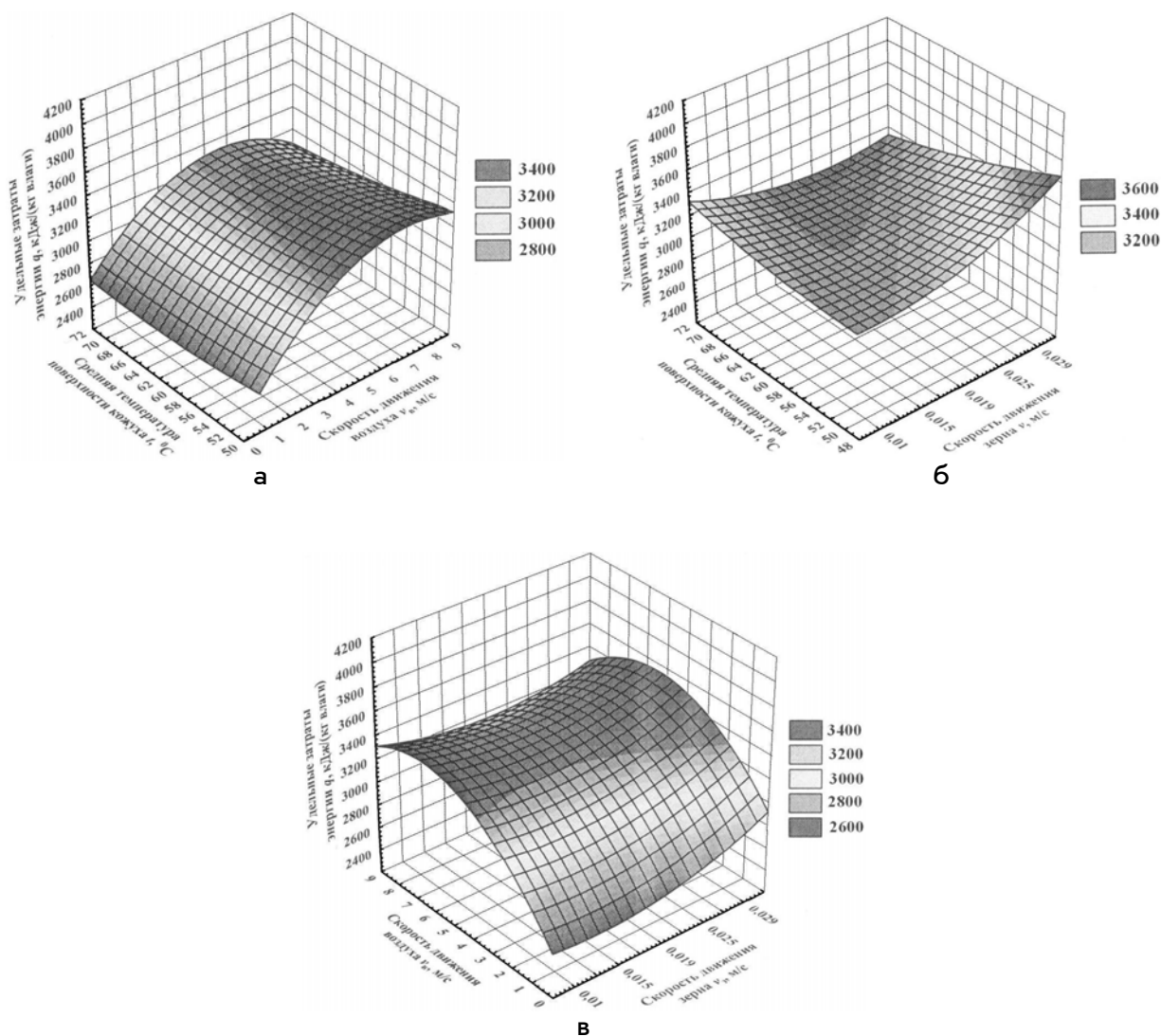


Рис. 2. Графическое изображение поверхностей отклика от взаимодействия:
 а – температуры греющей поверхности и скорости движения воздуха;
 б – температуры греющей поверхности и скорости движения зерна;
 в – скорости движения воздуха и скорости движения зерна

Для каждой из полученных математических моделей было определено корреляционное отношение и выполнена их проверка с помощью критериев Стьюдента, Фишера, Кохрена. Полученные расчетные значения приведены в таблице.

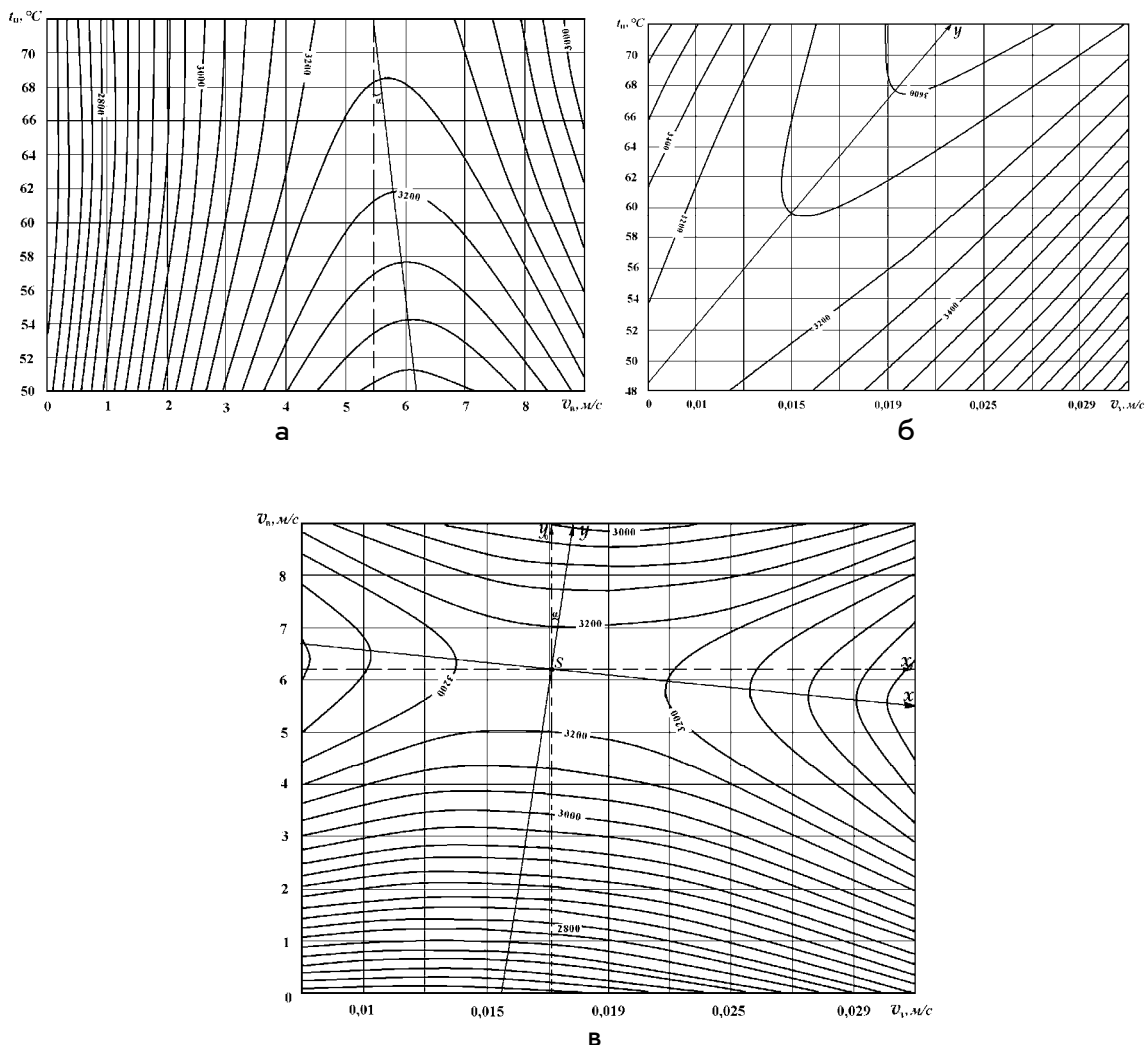


Рис. 3. Двухмерные сечения поверхностей отклика, характеризующие удельные затраты теплоты на испарение влаги, кДж/кг, от взаимодействия:
 а – t_w и v_a ; б – t_w и v_s ; в – v_a и v_s

Таблица

Результаты критериальной проверки уравнений регрессии

№ уравнения	Наименование критерия			
	R	t_p	F_p	G_p
1	0,872	6,359	1,958	0,345
2	0,901	5,569	1,875	0,461
3	0,891	10,369	1,945	0,459

Анализ полученных значений критериев и сравнение их с табличными данными показали адекватность полученных математических моделей, точность расчётов и достоверность проведённых экспериментов.

Эмпирическая проверка правильности канонического анализа полученных математических моделей процесса сушки в

установке контактного типа со шнековым рабочим органом показала, что средние значения удельных затрат теплоты на испарение влаги при лабораторных и производственных исследованиях отклоняются от полученных аналитическим путём оптимальных значений не более чем на $\pm 4,6\%$, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов.

Для подтверждения возможности использования установки для сушки зерна в небольших крестьянско-фермерских, личных подсобных и зерноперерабатывающих хозяйствах для уточнения ряда предположений, на которые опирались при разработке теоретических основ процесса сушки зерна и проектировании установки, а также для установления границ экономически эффективного использования установки для сушки зерна с выбранными конструктивными параметрами и режимами её работы были проведены исследования установки в производственных условиях (рис. 4).



Рис. 4. Технологическая линия подработки зерна:

- 1 – установка для сушки зерна;
- 2 – аппаратура для контроля температурного режима;
- 3 – комплект приборов для контроля энергетических показателей;
- 4 – винтовой транспортёр;
- 5 – сортировальная машина ПСМ-10

Испытываемая установка представляла собой модуль, входящий в технологическую линию послеуборочной обработки зерна. Пропускная способности при этом процессе составила 500 кг/ч. Причем при сушке зерна для последующего использования в технологических целях пропускную способность можно увеличить вдвое, в этом случае частота вращения транспортирующего рабочего органа также

увеличивается в два раза с помощью сменных шкивов.

При сушке зерна ржи средняя температура греющей поверхности составляла 45-75°C, съём влаги за один проход в пределах 2-6%, температура зерна на выходе из сушильной установки 30-40°C. При этом затраты теплоты на 1 кг испаренной влаги изменялись от 2,7 до 3,5 МДж. Заданный температурный режим не приводил к снижению продовольственных и семенных качеств зерна. Полученные данные свидетельствуют о достаточной эффективности процесса сушки в предложенной установке.

Результаты исследования процесса сушки зерна ржи в лабораторных и производственных условиях показывают, что основные показатели предлагаемой установки для сушки зерна лучше, чем аналогичные показатели выпускаемых промышленностью сушилок. Так, использование предлагаемого средства механизации позволяет снизить удельные затраты энергии на процессы сушки зерна в 1,3-1,54 раза, а металлоемкость – в 3-4 – раза по сравнению с существующими отечественными и зарубежными аналогами при обеспечении высокого качества готового продукта.

Годовая экономия от внедрения предложенной установки при сушке зерна ржи составила 29,038 тыс. руб., а экономический эффект превысил 100 руб. на 1 т продукции.

Библиографический список

1. Патент РФ № 2323580. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; опубл. 10.05.2008 г., Бюл. № 13.
2. Патент РФ № 2371650. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.Н. Зозуля; опубл. 27.10.2009 г., Бюл. № 30.
3. Патент РФ № 90970. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; опубл. 27.01.2010 г., Бюл. № 3.

