

На правах рукописи

СУТЯГИН Сергей Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ
УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА**

Специальность 05.20.01 - Технологии и средства
механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа - 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА»)

- Научный руководитель** доктор технических наук, профессор
Курдюмов Владимир Иванович
- Официальные оппоненты** **Юхин Геннадий Петрович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет», кафедра «Технологическое оборудование животноводческих и перерабатывающих предприятий», заведующий кафедрой
Сотников Максим Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия», кафедра «Механизация производства и переработки продукции животноводства», доцент
- Ведущая организация** ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»

Защита состоится 31 мая 2012 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.003.04 при ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет» по адресу: г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет».

Автореферат разослан «___» апреля 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

С.Г. Мударисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из основных задач обеспечения продовольственной безопасности России является устойчивое развитие производства зерна в достаточных объемах. Зерно - стратегически и социально-экономически значимый продукт, по наличию и уровню запасов которого судят о национальной продовольственной безопасности. В России ежегодно производят свыше 70 млн. т зерна, до 40 % которого производят фермерские хозяйства. На процессы тепловой обработки зерна приходится примерно 10 % от всего потребления энергии в агропромышленном комплексе развитых стран. Поэтому снижение энергоемкости этих процессов является актуальной задачей во всем мире.

Сушка зерна важный процесс в сельскохозяйственном производстве, своевременное выполнение которого, позволяет сохранить качественный зерновой материал в течение длительного времени. Тепловая обработка зерна, кроме сушки, может включать и его термическое обеззараживание, которое можно с успехом применять для борьбы с вредителями зерна (долгоносиками, клещами и др.), погибающими под действием высоких температур.

В настоящее время имеются высокопроизводительные автоматизированные средства механизации процесса тепловой обработки зерна. Однако с переходом на рыночную экономику появилась потребность в переработке зерна непосредственно в производящих хозяйствах. Применение существующих зерносушильных установок с большой пропускной способностью нерентабельно в условиях небольших фермерских хозяйств, так как связано с большими капитальными вложениями. Кроме того, существующие установки энерго- и металлоемки, загрязняют зерно и окружающую среду токсичными продуктами горения топлива. Несоответствие имеющейся технической базы условиям обработки зерна непосредственно на предприятии обуславливает необходимость разработки новых технических средств. В связи с этим, разработка технических средств заданной пропускной способности, интенсифицирующих процессы тепловой обработки зерна с учетом энерго-, ресурсосбережения, а также экологических требований является актуальной и важной научно-технической задачей.

Работа выполнена в соответствии с планами НИОКР Ульяновской ГСХА на 2006-2010 г.г. «Разработка средств механизации и технического обслуживания энерго- и ресурсосберегающих технологий в различных процессах производства и переработки продукции сельского хозяйства» (рег. № 01.200.600147) и на 2011-2015 г.г. «Разработка ресурсо-, энергосберегающих технологий и средств механизации сельского хозяйства» (рег. № 01.200.600147).

Цель работы. Интенсификация процесса тепловой обработки зерна путем разработки установки с определением ее оптимальных конструктивных параметров и режимов работы, обеспечивающих снижение затрат энергии и требуемое качество готового продукта при заданной пропускной способности.

Объект исследования. Технологический процесс тепловой обработки зерна.

Предмет исследования. Параметры технологического процесса тепловой

обработки зерна и конструктивно-режимные параметры средства механизации этого процесса.

Методика исследований. В теоретических исследованиях применены методы системного анализа и синтеза, имитационного моделирования, положения теории тепло-, массопереноса и теории сушки коллоидных капиллярнопористых тел, а также использованы положения и законы классической механики и математики. Экспериментальные исследования в лабораторных и производственных условиях проводили в соответствии с действующими ГОСТами, ОСТАми и разработанными частными методиками с применением методики планирования эксперимента. Полученные экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики с применением ПЭВМ.

Научная новизна работы.

Получены аналитические зависимости пропускной способности установки и мощности, затрачиваемой на процесс тепловой обработки зерна, от конструктивно-режимных параметров установки и свойств обрабатываемого материала.

Разработана математическая модель процесса сушки зерна в зависимости от конструктивно-режимных параметров разработанной установки контактного типа;

Теоретически и экспериментально обоснованы оптимальные конструктивно-режимные параметры установки для тепловой обработки зерна.

Новизна технических решений предложенной установки подтверждена 3 патентами РФ на изобретения и 8 патентами на полезные модели.

Практическая ценность. Предложенную установку можно применять в технологических процессах сушки зерна в период послеуборочной его обработки, подготовки семян к посеву, в технологиях переработки зерна в муку и крупы, а также в технологиях термического обеззараживания зерна при его хранении. Применение разработанной установки позволяет высушить зерно с требуемым качеством при удельных затратах энергии 3,8 МДж/кг_{влаги}, что ниже на 17,4 % по сравнению с сушильной установкой СЗШ-0,5, а также выполнить термическое обеззараживание зерна с низкими затратами энергии.

Использование разработанной установки позволяет получить годовой экономический эффект 248380 руб. или 404,54 рубля на 1 т продукции.

Реализация результатов исследований. Установка для тепловой обработки зерна исследована и внедрена в производство на предприятии ООО «Агрофирма Агроинвест» Кузоватовского района Ульяновской области.

Вклад автора в проведенное исследование. Получены аналитические выражения для определения пропускной способности установки и мощности, затрачиваемой на процесс тепловой обработки зерна; проведены экспериментальные исследования установки для тепловой обработки зерна; получены адекватные математические модели процесса сушки зерна; выявлены оптимальные конструктивно-режимные параметры разработанной установки.

Апробация работы. Основные научные положения диссертационной работы, доложены, обсуждены и одобрены на III Международной научно-практической конференции «Технология и продукты здорового питания» (Са-

ратовский ГАУ, 2009 г.), на XLIX Международной научно-технической конференции «Достижения науки - агропромышленному производству» (Челябинская ГАА, 2010 г.), на Международной научно-практической конференции «Новые направления в решении проблем АПК на основе современных ресурсосберегающих, инновационных технологий» (Волгоград, 2010 г.), на Международной научно-практической конференции «Научное обеспечение агропромышленного производства» (Курская ГСХА, 2010 г.), на Международной научно-практической конференции «Наука о проблемах инновационного развития в АПК» (Великолукская ГСХА, 2010 г.), на Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и бизнеса для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации» (Донской ГАУ, 2010 г.), на Международной научно-практической конференции «Инновационному развитию АПК - научное обеспечение» (Пермская ГСХА, 2010 г.), на Международной научно-практической конференции «Вавиловские чтения-2010» (Саратовский ГАУ, 2010 г.), на L Международной научно-практической конференции «Достижения науки - агропромышленному производству» (Челябинская ГАА, 2011 г.), на Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Кобы В.Г. (Саратовский ГАУ, 2011 г.), на Всероссийской научно-практической конференции «Научное обеспечение развития АПК в современных условиях», (Ижевская ГСХА, 2011 г.), а также на ежегодных Международных научно-практических конференциях ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА» в 2010 - 2011 г.г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 36 печатных работах, в том числе 3 патентах на изобретение и 8 патентах на полезные модели, 7 работ - в перечне изданий, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов и общих выводов. Работа изложена на 132 с., содержит 40 рисунков, 12 табл. и приложение на 64 с. Список литературы включает 150 наименований, в том числе 12 - на иностранных языках.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

- теоретические выражения по определению конструктивно-режимных параметров разработанной установки для тепловой обработки зерна;
- математические модели процесса сушки зерна в разработанной установке;
- конструкция установки для тепловой обработки зерна контактного типа со скребковым рабочим органом;
- результаты лабораторных исследований по определению оптимальных режимов работы установки для тепловой обработки и их проверки в производственных условиях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность выбранной темы исследований.

В первом разделе *«Состояние вопроса. Цель и задачи исследования»* выполнен анализ существующих технологий тепловой обработки зерна, предназначенных для этого технических средств, и разработана их классификация.

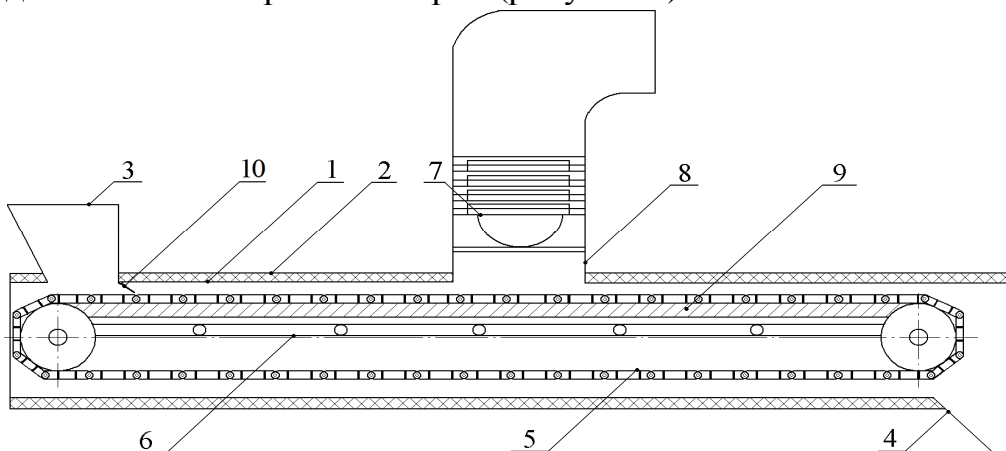
В развитие современной технологии и техники тепловой обработки зерна внесли большой вклад: А.П. Гержой, В.Ф. Самочетов, А.М. Уваров, В.А. Резчиков, Л.Д. Комышник, Г.С. Зелинский, В.С. Уколов, В.С. Кршеминский, О.Н. Каткова, Н.И. Денисов, В.И. Жидко, В.И. Атаназевич, С.Д. Птицын, В.И. Анискин, Г.С. Окунь, Ф.Т. Гоголев, Н.Я. Попов, В.Ф. Некрашевич, В.И. Курдюмов и многие другие ученые.

Несмотря на большое количество научных работ, посвященных различным аспектам тепловой обработки зерна, задача интенсификации технических средств этого процесса в настоящее время решена не полностью. Поэтому исследование процесса тепловой обработки зерна, направленное на снижение затрат энергии с учетом обеспечения высокого качества тепловой обработки при заданной производительности, является актуальной и важной задачей.

С учетом этого сформулирована цель работы и определены **задачи исследований**:

- выполнить анализ существующих способов и средств механизации тепловой обработки зерна, выявить основные направления их совершенствования и разработать конструкцию установки для тепловой обработки зерна;
- дать теоретическое и экспериментальное обоснование установки для тепловой обработки зерна, определить ее оптимальные конструктивные параметры и режимы работы;
- проверить теоретически и экспериментально обоснованные режимы тепловой обработки разработанной установки в производственных условиях;
- оценить экономическую эффективность предлагаемой установки для тепловой обработки зерна при выбранных оптимальных режимах.

Во втором разделе *«Теоретическое обоснование процесса тепловой обработки зерна и семян»* дано описание предложенной и запатентованной установки для тепловой обработки зерна (рисунок 1).



- 1 - кожух; 2 - теплоизолирующий материал; 3 - загрузочный бункер; 4 - выгрузное окно; 5 - транспортирующий рабочий орган; 6 - нагревательные элементы; 7 - вентилятор; 8 - воздухопровод; 9 - греющая пластина; 10 - заслонка

Рисунок 1 - Установка для тепловой обработки зерна

Установка работает следующим образом. Включают нагревательные элементы. После достижения необходимой температуры пластины подают зерно в загрузочный бункер, откуда оно поступает на греющую пластину. Скребки транспортирующего рабочего органа захватывают зерно, верхние слои которого заслонка отсекает и равномерно распределяет по греющей пластине, при этом обрабатываемый материал, вращаясь вокруг своей оси при движении вдоль пластины, перемещается рабочим органом в единичном слое к выгрузному окну. Контактируя с нагретой поверхностью пластины, зерно также нагревается, теряет излишки влаги, которые в виде пара выдуваются через загрузочный бункер и выгрузное окно. Сухое зерно удаляется из установки через выгрузное окно.

Для достижения оптимальных количественно-качественных показателей тепловой обработки зерна и семян в установке необходимо, чтобы обрабатываемый материал перемещался в единичном слое, т. е., высота скребков транспортирующего рабочего органа была соизмерима с высотой частиц перемещаемого зерна. Высота скребков транспортирующего рабочего органа

$$H = kl, \quad (1)$$

где k - геометрический коэффициент; l - длина зерна, м.

С учетом обеспечения заданной пропускной способности ширина скребков рабочего органа

$$B = Q / (k \gamma \psi v_1 l), \quad (2)$$

где Q - пропускная способность установки, кг/с; γ - насыпная плотность зерна, кг/м³; ψ - коэффициент заполнения межскребкового пространства; v_1 - скорость движения транспортирующего рабочего органа, м/с.

Оптимальная скорость движения транспортирующего рабочего органа

$$v_1 = \frac{Q}{0,15 \gamma L_T (B + 0,15 a_C \cdot ctg \alpha)}, \quad (3)$$

где L_T - длина греющей пластины, м; a_C - межскребковое расстояние, м; α - угол естественного откоса перемещаемого материала, град.

В предложенной установке для тепловой обработки зерна реализован контактный способ передачи теплоты обрабатываемому материалу, который нагревают путем теплопроводности от греющей поверхности и обдувают нагретым воздухом, подаваемым в рабочую камеру установки.

Тепловой баланс процесса сушки зерна характеризует основное уравнение тепло- и влагообмена при контактном способе передачи теплоты зерну в предложенной установке

$$\lambda_3 \frac{t_{zp.cp} - t_3}{h_k} + \alpha_{конв} (t_в - t_3) - c \rho_0 R_v \frac{dt}{d\tau} - rj = 0, \quad (4)$$

где λ_3 - эквивалентный коэффициент теплопроводности, Дж/(м·с·°C); $t_{zp.cp}$ - средняя температура греющей поверхности, °C; t_3 - температура зерна, °C; h_k - толщина контактного слоя, м; $\alpha_{конв}$ - коэффициент теплообмена между воздухом и зерном, Дж/(м²·с·°C); $t_в$ - температура воздуха, °C; c - удельная теплоемкость зерна, Дж/(кг·°C); ρ_0 - плотность абсолютно сухого зерна, кг/м³; R_v -

отношение объема абсолютно сухого зерна к площади поверхности влажного зерна, м; τ - время тепловой обработки зерна, с; r - удельная теплота парообразования, Дж/кг; j - поток влаги внутри зерна, кг/(м²·с).

На основе основного уравнения тепло- и влагообмена описан механизм тепловой обработки зерна в предложенной установке.

В процессе работы установки скребки перемещают зерно по греющей пластине. Сила, N , необходимая для перемещения подаваемого в установку зернового материала транспортирующим рабочим органом,

$$F_T = 0,5nN_C \left(N_2 + \left(\frac{N_1 - G}{N_2} \right) N_1 \right), \quad (5)$$

где n - количество зерен, перемещаемых одним скребком; N_C - количество скребков в транспортирующем рабочем органе; N_1, N_2 - нормальные реакции на зерно от греющей поверхности и скребка соответственно, Н; G - сила тяжести частицы зернового материала, Н.

Механические воздействия скребков транспортирующего рабочего органа на зерно представляют собой динамические и ударные нагрузки, что приводит к его травмированию. Сила удара зерна о плоскую поверхность скребка, N

$$F_y = 0,73m^{0,6}v_1^{1,2} \left(\sqrt[3]{lb_1a_1} \right)^{0,2} \left[\frac{E_1E_2}{(E_1(1-\mu_1^2) + E_2(1-\mu_2^2))} \right]^{0,4}, \quad (6)$$

где m - масса скребка рабочего органа, кг; b_1, a_1 - соответственно толщина и ширина зерна, м; E_1, E_2 - модули упругости зерна и материала скребка транспортирующего рабочего органа, Па; μ_1, μ_2 - коэффициенты поперечной деформации зерна и материала скребка транспортирующего рабочего органа.

Изменяя эти параметры в различных вариациях, можно уменьшить силу соударения зерна с рабочими поверхностями транспортирующего рабочего органа, что позволяет снизить вероятность повреждения зерна при его перемещении, повысить качество готового материала после тепловой обработки в разработанной установке.

При расчете пропускной способности разработанной установки необходимо учитывать ее конструктивно-режимные параметры и свойства обрабатываемого материала. Пропускная способность установки, кг/с,

$$Q = \gamma \psi v_1 B H, \quad (7)$$

где H - высота скребков транспортирующего рабочего органа, м.

В процессе работы установки для тепловой обработки зерна и семян мощность требуется на привод скребкового транспортирующего рабочего органа, нагрев греющей пластины, привод вентилятора, установленного в воздуховоде установки, и на нагрев воздуха, подаваемого вентилятором:

$$N = N_{II} + N_{HЭ} + N_B + N_{Э}, \quad (8)$$

где N_{II} - мощность, требуемая на привод транспортирующего рабочего органа, Вт; $N_{HЭ}$ - мощность, необходимая для нагрева греющей пластины в установке, Вт; N_B - мощность, потребляемая вентилятором, установленным в

воздуховоде установке, Вт; $N_{\text{Э}}$ - мощность, потребляемая электрокалорифером, Вт.

Мощность, требуемая на привод транспортирующего рабочего органа,

$$N_{\text{П}} = (F_{\text{T}} + F_{\text{И}})(k_{N_3} + 1)(A + 1)v_1 L_{\text{T}} / a_{\text{С}}, \quad (9)$$

где F_{T} - сила, необходимая для перемещения подаваемого в установку зернового материала транспортирующим рабочим органом, Н; $F_{\text{И}}$ - сила инерции перемещаемого волочением зерна, Н; k_{N_3} - коэффициент пропорциональности; A - коэффициент влияния конструкции выгрузного устройства; L_{T} - длина греющей пластины, м; $a_{\text{С}}$ - расстояние между скребками транспортирующего рабочего органа, м.

Мощность, необходимая для нагрева греющей пластины в установке, определяет мощность нагревательных элементов:

$$N_{\text{НЭ}} = U_{\text{Ф}}^2 S / (\rho_{\text{T}} l), \quad (10)$$

где $U_{\text{Ф}}$ - фазное напряжение, В; S - площадь сечения нагревателя, м²; ρ_{T} - удельное электрическое сопротивление материала электронагревателя, Ом·м; l - длина нагревателя, м.

Мощность, потребляемая вентилятором,

$$N_{\text{В}} = \frac{k_3 L H_{\text{П}}}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{\text{В}} \eta_{\text{П}}}, \quad (11)$$

где k_3 - коэффициент запаса; L - количество воздуха, подаваемого вентилятором в установку, м³/ч; $H_{\text{П}}$ - потери давления в воздуховоде, Па; $\eta_{\text{В}}$ - коэффициент полезного действия вентилятора; $\eta_{\text{П}}$ - коэффициент полезного действия передачи.

Мощность, потребляемая электрокалорифером,

$$N_{\text{Э}} = c \gamma_{\text{В}} V_{\text{В}} (t_{\text{К}} + t_{\text{Н}}) + \frac{(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}}) F}{\frac{1}{\alpha_{\text{ВН}}} + \frac{s_{\text{С}}}{\lambda_{\text{С}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{НАР}}}}, \quad (12)$$

где c - удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); $\gamma_{\text{В}}$ - плотность наружного воздуха, кг/м³; $V_{\text{В}}$ - расход нагреваемого воздуха, м³/с; $t_{\text{Н}}$ и $t_{\text{К}}$ - начальная и конечная температуры воздуха, °С; $t_{\text{ВН}} = 0,5(t_{\text{Н}} + t_{\text{К}})$ - средняя температура внутри нагревательной камеры, °С; $t_{\text{НАР}}$ - температура наружного воздуха, °С; F - площадь стенок воздуховода, через которую теряется теплота, м²; $s_{\text{С}}$ - толщина стенки, м; $\alpha_{\text{ВН}}$ и $\alpha_{\text{НАР}}$ - коэффициенты теплоотдачи от нагретого воздуха к внутренней поверхности стенки и от внешней поверхности стенки к наружному воздуху соответственно, Вт/(м²·°С); $\lambda_{\text{С}}$ - теплопроводность материала стенки, Вт/(м·°С).

В процессе работы установки для тепловой обработки зерна при заданной пропускной способности затрачиваемая мощность постоянна, кроме мощности, которая требуется на нагрев греющей поверхности. Поэтому при оптимизации режимов работы установки, силы тока, напряжения, подаваемого на нагревательные элементы, можно снизить затраты электрической энергии на процесс

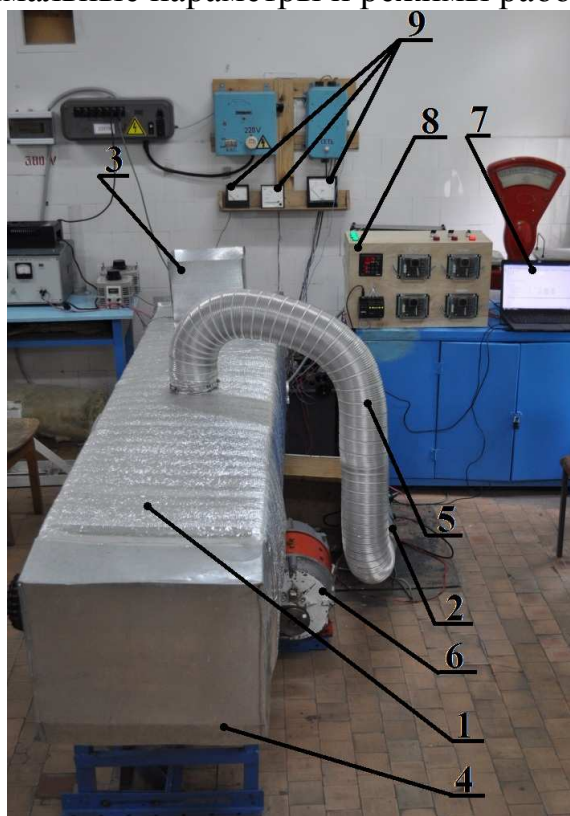
тепловой обработки зернового материала в установке при обеспечении требуемого качества готового продукта.

Удельные затраты энергии на тепловую обработку зерна в разработанной установке, Вт·ч/т,

$$q_{\text{уд}} = 3,6N/Q. \quad (13)$$

Удельные затраты энергии - один из основных критериев, который используют для оценки эффективности работы установок для тепловой обработки зерна и их сравнения.

В третьем разделе «*Исследование процесса тепловой обработки зерна в лабораторных условиях*» представлены программа и методика экспериментальных исследований, основанные на действующих ГОСТах. Дано описание конструкции разработанной лабораторной установки (рисунок 2), блока автоматического управления температурным режимом (рисунок 3), оборудования и измерительной аппаратуры, представлены результаты выполненных исследований, определены оптимальные параметры и режимы работы установки.



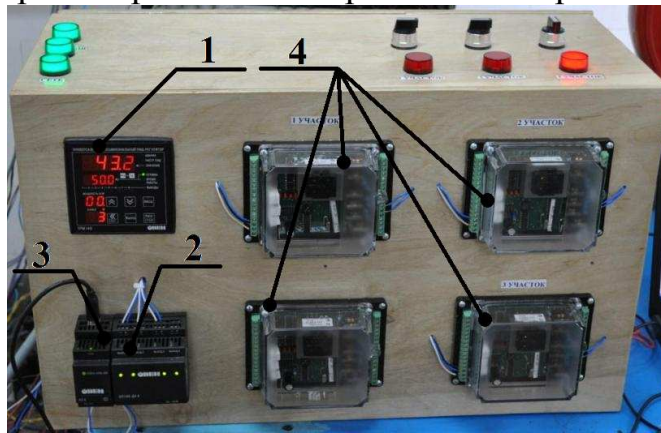
1 - кожух; 2 - электрокалорифер; 3 - загрузочный бункер; 4 - выгрузное окно; 5 - воздуховод; 6 - электродвигатель; 7 - персональный компьютер; 8 - блок автоматического управления температурным режимом; 9 - контрольно-измерительная аппаратура

Рисунок 2 - Лабораторная установка для тепловой обработки зерна

Результаты исследований получены с использованием методики планирования экспериментов, статистической обработки на персональном компьютере при помощи пакетов программ «Exel», STATISTICA 6.1» и «Derive 5».

Для лабораторных исследований процесса тепловой обработки зерна использовали овес сорта «Конкур». В разработанной установке исследовали про-

цессы сушки и термического обеззараживания зерна. В качестве критерия оптимизации при сушке принят показатель удельных затрат энергии на 1 кг испаренной влаги $q_{уд}$, кДж/кг_{влаги}, а при термическом обеззараживании принят показатель удельных затрат энергии на 1 т зернового материала.



1 - регулятор ТРМ - 148; 2 - блок питания; 3 - преобразователь интерфейса; 4 - блок управления симисторами и тиристорами (БУСТ)

Рисунок 3 - Блок автоматического управления температурным режимом

Учитывая требования, предъявляемые к факторам (управляемость, однородность и отсутствие корреляции между ними), а также на основе априорной информации, из 19 независимых факторов выделены четыре фактора, которые оказывают наибольшее влияние на процесс тепловой обработки зерна в разработанной установке: x_1 ($t_{cp.ср.}$) - средняя температура греющей поверхности; x_2 (τ) - время нахождения зерна в установке; x_3 ($v_в$) - скорость движения воздуха в установке; x_4 ($t_в$) - температура воздуха, подаваемого в установку.

На основании ранее выполненных исследований и результатов поисковых опытов приняты пределы варьирования основных независимых факторов: средняя температура греющей поверхности - 40...200 °С, время нахождения зерна в установке - 15...60 с, скорость движения воздуха в кожухе установки - 0...10 м/с, а также температура подаваемого воздуха - 20...70 °С.

После обработки результатов проведенных экспериментов получено уравнение регрессии в натуральных значениях факторов, характеризующее влияние скорости подаваемого в кожух установки воздуха и его температуры на удельные затраты энергии

$$q_{уд} = 4100,73 - 287,88v_в - 10,8t_в + 2v_в^2 + 10,28v_в t_в + 0,22 t_в^2. \quad (14)$$

Уравнение (14) в кодированных значениях факторов принимает следующий вид:

$$Y = 4017,97 + 587,24x_3 + 332,08x_4 + 216,27x_3^2 + 463,01x_3x_4 + 49,82x_4^2, \quad (15)$$

где Y - удельные затраты энергии, кДж/кг_{влаги}.

Анализ уравнений (14) и (15) показывает, что наибольшее влияние на удельные затраты энергии среди линейных и нелинейных членов оказывает скорость воздуха, причем ее увеличение приводит к увеличению параметра оптимизации. Наименьшее воздействие, среди линейных и нелинейных членов, оказывает температура воздуха, причем при ее увеличении значение Y увеличивается.

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия скорости воздуха, его температуры и их совместного влияния на критерий оптимизации представлено на рисунке 4.

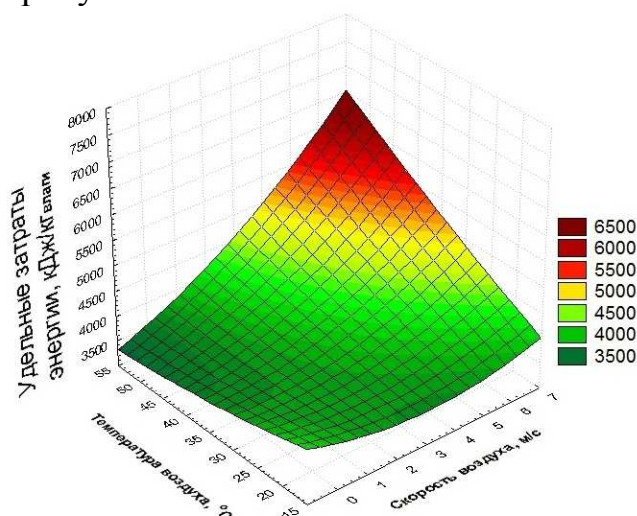


Рисунок 4 - Поверхность отклика характеризующее влияние v_6 и t_6 на критерий оптимизации q_{y0}

Данная поверхность имеет вогнутую форму, в центре которой находится локальный минимум удельных затрат энергии на процесс сушки.

Уравнение регрессии в натуральных значениях факторов, характеризующее влияние средней температуры греющей поверхности и скорости движения воздуха на удельные затраты энергии, имеет следующий вид:

$$q_{y0} = 3648,93 + 4,52t_{cp.cp.} + 12,04v_6 - 0,03t_{cp.cp.}^2 - 0,47t_{cp.cp.} \cdot v_6 + 32,35v_6^2. \quad (16)$$

Уравнение (16) в кодированных значениях факторов:

$$Y = 4046,46 - 23,93x_1 + 527,34x_3 - 19,59x_1^2 - 35,04x_1 x_3 + 291,14x_3^2, \quad (17)$$

Анализ коэффициентов уравнений (16) и (17) показывает, что наибольшее влияние на параметр оптимизации из линейных членов оказывает скорость воздуха, причем с ее увеличением удельные затраты энергии на процесс сушки увеличиваются. Наименьшее влияние оказывает средняя температура греющей поверхности, увеличение которой приводит к уменьшению удельных затрат энергии. Среди нелинейных членов наибольшее влияние также оказывает скорость движения воздуха, причем ее увеличение способствует увеличению удельных затрат энергии. Наименьшее влияние оказывает средняя температура греющей поверхности и при ее увеличении параметр оптимизации снижается.

Уравнения регрессии в натуральных и кодированных значениях факторов, характеризующие влияние средней температуры греющей поверхности и времени нахождения зерна в установке на удельные затраты энергии соответственно:

$$q_{y0} = 3070,23 + 8,71t_{cp.cp.} + 36,28\tau - 0,03 t_{cp.cp.}^2 - 0,16 t_{cp.cp.} \cdot \tau - 0,11\tau^2, \quad (18)$$

$$Y = 4321,88 - 33,01x_1 + 309,04x_2 - 19,6x_2^2 - 69,55x_1x_2 - 33,83x_2^2, \quad (19)$$

Анализ уравнений (18) и (19) показывает, что наибольшее влияние на величину удельных затрат энергии среди линейных членов оказывает время нахождения зерна в установке, причем с его увеличением значение параметра оп-

тимизации также увеличивается. Наименьшее влияние на критерий оптимизации среди линейных и нелинейных членов оказывает средняя температура греющей поверхности, причем при ее увеличении значение удельных затрат энергии уменьшается. Наибольшее влияние на величину удельных затрат энергии среди нелинейных членов оказывает также время нахождения зерна в установке, причем с его увеличением параметр оптимизации также уменьшается.

Аналогично получены уравнения регрессии в натуральных и кодированных значениях факторов, характеризующие влияние факторов x_2x_3 , x_2x_4 и x_1x_4 на удельные затраты энергии.

Для каждой математической модели определено корреляционное отношение и выполнена проверка с помощью критериев Кохрена, Фишера, Стьюдента. Анализ полученных значений критериев и сравнение их с табличными значениями показал воспроизводимость результатов исследований, адекватность математических моделей и значимость коэффициентов уравнений регрессии.

После определения вида поверхностей отклика выполняли их анализ с помощью двумерных сечений. Находили центр поверхности отклика, определяя частные производные по каждому фактору, и приравнивали полученные выражения нулю. После этого выполняли каноническое преобразование моделей второго порядка и графоаналитический анализ полученных выражений.

Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее удельные затраты энергии от совместного влияния скорости воздуха и температуры его нагрева, представлено на рисунке 5.

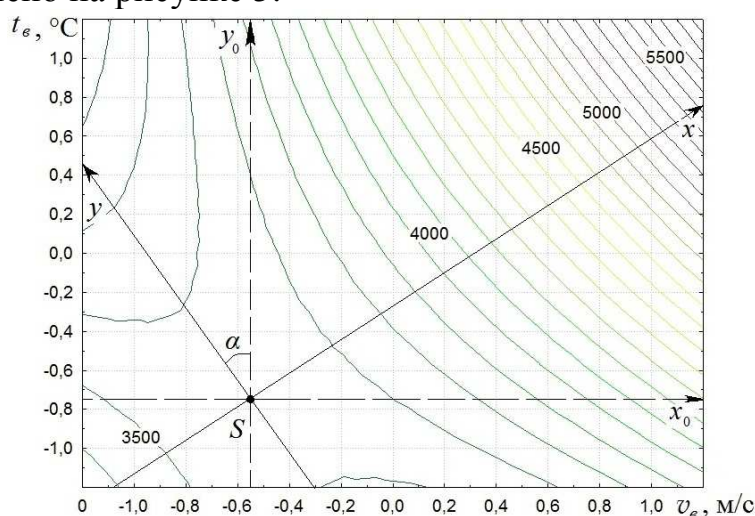


Рисунок 5 - Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее влияние v_g и t_g на $q_{y\delta}$

Анализ двухмерного сечения показал, что оптимальные значения независимых факторов составляют: $v_g = 1,33$ м/с, $t_g = 23,8$ °С. При этом минимальные удельные затраты энергии на процесс сушки зерна - 3914,63 кДж/кг_{влаги}.

Аналогично был выполнен канонический анализ уравнений регрессии от взаимодействия остальных независимых факторов.

В результате анализа математических моделей процесса сушки зерна определены оптимальные значения факторов, при которых удельные затраты энергии на испарение влаги из зерна овса $q_{y\delta,ont}$ составляют 3873,3 кДж/кг_{влаги}:

$t_{гр.сп.} = 69 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 40 \text{ с}$, $v_g = 1,33 \text{ м/с}$ и $t_g = 23,8 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом разовый влагосъем составляет 2,7...3 % при пропускной способности установки 400 кг/ч.

В режиме термического обеззараживания исследовали зерно овса сорта «Конкур». Исследования проводили при изменении температуры греющей поверхности 60...90 °С и времени нахождения зерна в установке 100...200 с. Результаты показали, что при исходной 2-й степени зараженности зерна после тепловой обработки при температуре греющей поверхности 80 °С и времени нахождения зерна в установке 180 с все вредители погибли, технологические качества зерна при этом не снизились. Удельные затраты энергии при этом составили 4,1 кВт·ч/т зернового материала, а пропускная способность установки - 210 кг/ч.

В четвертом разделе «Исследование процесса тепловой обработки зерна в производственных условиях и его экономическая эффективность» приведена программа, методика и результаты производственных исследований, проведенных в ООО «Агрофирма Агроинвест».

Исследования в производственных условиях подтвердили результаты лабораторных исследований. Расхождение значений основных показателей процесса тепловой обработки зерна не превысило 4,7 %.

Показатели технико-экономической эффективности разработанной установки приведены в сравнении с серийно выпускаемой установкой СЗШ-0,5, которая предназначена для тепловой обработки зерна в фермерских хозяйствах. Предлагаемая установка имеет в 4,8 раза меньшую энергоемкость и значительно меньшую металлоемкость. Годовая экономия составила 248380,2 руб., экономический эффект - 404,54 рубля на 1 т продукции, при этом срок окупаемости установки для тепловой обработки зерна не превышает 0,3 года.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ существующих способов и средств механизации тепловой обработки зерна показал что, для снижения затрат энергии и экономии эксплуатационных затрат целесообразно разрабатывать установки сравнительно небольшой пропускной способности, основанные на применении контактного способа подвода теплоты обрабатываемому зерновому материалу, при перемещении зерна в единичном слое.

Разработана установка для тепловой обработки зерна, которая включает кожух прямоугольного сечения длиной 2150 мм, шириной 410 мм и высотой 400 мм, внешняя поверхность которого покрыта слоем теплоизолирующего материала, загрузочный бункер, выгрузное окно, установленный внутри кожуха скребковый транспортер с высотой скребков 10 мм, греющую пластину длиной 2000 мм, нагревательные элементы, расположенные с нижней стороны греющей пластины, воздухопровод и вентилятор. Воздуховод, в котором установлен нагревательный элемент, соединен с кожухом на равном расстоянии от загрузочного бункера и выгрузного окна.

2. В результате теоретических исследований сформулированы зависимости пропускную способность установки и мощности, требуемой на осуществление

процесса тепловой обработки зерна, от конструктивно-режимных параметров установки и свойств обрабатываемого материала.

По результатам проведенных лабораторных исследований разработаны адекватные математические модели процессов тепловой обработки зерна в разработанной установке. Анализ моделей процесса сушки зерна позволил определить оптимальные значения независимых факторов, при которых удельные затраты энергии на испарение влаги из зерна овса составляют 3873,3 кДж/кг_{влаги}: средняя температура греющей поверхности $t_{cp.onm} = 69$ °С, время нахождения зерна в установке $\tau = 40$ с, скорость движения воздуха $v_g = 1,33$ м/с, температура воздуха $t_g = 23,8$ °С. Пропускная способность установки при этом составляет 400 кг/ч.

Оптимальным режимом термического обеззараживания зерна овса при минимальных удельных затратах энергии 4,1 кВт·ч/т является следующий: средняя температура греющей поверхности - 80 °С, время обработки - 180 с.

3. Производственные исследования разработанной установки для тепловой обработки зерна показали высокую эффективность при применении ее в процессах сушки и термического обеззараживания зерна. Расхождения значений основных показателей процесса тепловой обработки зерна, полученных в производственных и лабораторных условиях, не превысили 4,7 %.

4. Техничко-экономический анализ предлагаемой установки для тепловой обработки зерна в сравнении с сушильной установкой СЗШ-0,5 показал, что при работе на оптимальных режимах предлагаемая установка по сравнению с серийно выпускаемой имеет в 4,8 раза меньшую энергоемкость и значительно меньшую металлоемкость. Годовая экономия составила 248380,2 руб., экономический эффект - 404,54 рубля на 1 т продукции, при этом срок окупаемости установки для тепловой обработки зерна не превышает 0,3 года.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Сутягин С.А. Новые средства механизации тепловой обработки сыпучих материалов / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - Москва, 2010, № 11, с. 11...12.

2. Сутягин С.А. Обжаривание сыпучих продуктов / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, И.Н. Зозуля // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - Москва, 2011, № 1, с. 23 - 24.

3. Сутягин С.А. Тепловая обработка зерна при производстве кормов / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, И.Н. Зозуля, С.А. Сутягин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - Москва, 2011, № 5, с. 17...18.

4. Сутягин С.А. Особенности тепловой обработки пищевых продуктов в установках контактного типа / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Известия вузов. Пищевая технология. - Краснодар, 2011, № 4, с. 90...92.

5. Сутягин С.А. Установка для термического обеззараживания зерна / В.И.

Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова, № 10, 2011, с. 55...59.

6. Сутягин С.А. О возможности снижения энергозатрат в установках контактного типа для сушки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, № 11, 2011, с. 101...106.

7. Сутягин С.А. Повышение эффективности послеуборочной обработки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук, № 6, 2011, с. 56...58.

Патенты

8. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки зерна. - Патент РФ на полезную модель № 90970. Оpubл. 27.01.2010 г., Бюл. № 3.

9. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки зерна. - Патент РФ на полезную модель № 92603. Оpubл. 27.03.2010 г., Бюл. № 19.

10. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки зерна. - Патент РФ на полезную модель № 96466. Оpubл. 10.08.2010 г., Бюл. № 22.

11. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки зерна. - Патент РФ на полезную модель № 96467. Оpubл. 10.08.2010 г., Бюл. № 22.

12. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки зерна. - Патент РФ на полезную модель № 96468. Оpubл. 10.08.2010 г., Бюл. № 22.

13. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки и обеззараживания зерна. - Патент РФ на полезную модель № 99130. Оpubл. 10.11.2010 г., Бюл. 31.

14. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки зерна. - Патент РФ на полезную модель № 99131. Оpubл. 10.11.2010 г., Бюл. 31.

15. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки зерна. - Патент РФ на полезную модель № 110291. Оpubл. 20.11.2011 г., Бюл. 32.

16. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки зерна. - Патент РФ на изобретение № 2411432. Оpubл. 10.02.2011 г., Бюл № 4.

17. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки зерна. - Патент РФ на изобретение № 2413912. Оpubл. 10.03.2011 г., Бюл № 7.

18. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. Устройство для сушки зерна. - Патент РФ на изобретение № 2436630. Оpubл. 20.12.2011 г., Бюл № 17.

Публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций

19. Сутягин С.А. Методика обработки результатов исследования процесса сушки зерна в установке контактного типа / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Технология и продукты здорового питания: Материалы III Международной научно-практической конференции. - Саратов: ООО Издательство

«КУБиК», 2009, с. 76...80.

20. Сутягин С.А. Реализация процессов тепловой обработки сыпучих сельскохозяйственных материалов в установках контактного типа / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // XLIX Международная научно-техническая конференция «Достижения науки - агропромышленному производству», ч 2. - Челябинск: ЧГАА, 2010, с. 255...258.

21. Сутягин С.А. Анализ существующих сушильных камер зерносушилок / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Новые направления в решении проблем АПК на основе современных ресурсосберегающих, инновационных технологий. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию Победы в Великой Отечественной войне, Волгоград 26 - 28 января 2010 г., т. 2. - Волгоград: ИПК «Нива», 2010, с. 196...199.

22. Сутягин С.А. Свойства зерна как объекта сушки / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Научное обеспечение агропромышленного производства. Материалы Международной научно-практической конференции, 20 - 22 января 2010 г. - Курск, Изд. Курск. гос. с.-х. акад., 2010, с. 129...132.

23. Сутягин С.А. Критерии подобия и моделирования процесса сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Наука о проблемах инновационного развития в АПК. Сборник материалов международной научно-практической конференции. - Великие Луки: РИО ВГСХА, 2010, с. 103...106.

24. Сутягин С.А. Особенности конвективной и кондуктивной сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, И.Н. Зозуля, С.А. Сутягин // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы аграрной науки и образования», Ульяновск: ГСХА, 2010, т. III, ч. 1, ч. 2, с. 103...106.

25. Сутягин С.А. Интенсификация процесса тепловой обработки сыпучих сельскохозяйственных материалов / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, И.Н. Зозуля, С.А. Сутягин // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы аграрной науки и образования», Ульяновск: ГСХА, 2010, т. III, ч. 1, ч. 2, с. 126...129.

26. Сутягин С.А. Интенсификация тепловой обработки сыпучих сельскохозяйственных материалов / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, И.Н. Зозуля, С.А. Сутягин // Материалы Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и бизнеса для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации», 2 - 4 февраля 2010 г. - Пос. Персиановский, Донской ГАУ, 2010, с. 108...110.

27. Сутягин С.А. Научные основы сушки сыпучих материалов / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Материалы Международной научно-практической конференции «Молодежь и наука XXI века», Ульяновск: ГСХА, 2010, т. IV, с. 62...64.

28. Сутягин С.А. Энергосберегающая технология и средства механизации процессов тепловой обработки сыпучих сельскохозяйственных материалов / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, И.Н. Зозуля, С.А. Сутягин // Сборник научно-исследовательских работ аспирантов финалистов конкурса аспирантов и молодых ученых в области энергосбережения в промышленности. г. Новочеркасск,

октябрь 2010 г./ Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. (НПИ). - Новочеркасск: Лик, 2010, с. 264...267.

29. Сутягин С.А. Анализ способов тепловой обработки пищевых продуктов / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, И.Н. Зозуля, С.А. Сутягин // Международная научно-практическая конференция «Инновационному развитию АПК - научное обеспечение», 18 ноября 2010 г. - Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2010, с. 288...290.

30. Сутягин С.А. Особенности сушки материалов в зависимости от форм связи с ним влаги / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Вавиловские чтения-2010: Материалы международной научно-практической конференции в 3 томах - Саратов: Изд-во КУБИК, 2010, т. 3, с. 313...315.

31. Сутягин С.А. Механизм процесса сушки капиллярно-пористых тел при контактном и конвективном способах / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Материалы I международной научно-практической конференции «Достижения науки - агропромышленному производству». - Челябинск: ЧГАА, 2011, ч. IV, с. 86...89.

32. Сутягин С.А. Аспекты совершенствования технологии сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Материалы I международной научно-практической конференции «Достижения науки - агропромышленному производству». - Челябинск: ЧГАА, 2011, ч. IV, с. 111...115.

33. Сутягин С.А. Применение тепловой обработки зерна в кормопроизводстве / В.И. Курдюмов, В.Г. Артемьев, А.А Павлушин, И.Н. Зозуля, С.А. Сутягин // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Кобы В.Г. / Под ред. Е.Е. Демина. - Саратов: Издательство «КУБиК», 2011, с. 93...94.

34. Сутягин С.А. К вопросу о травмировании зерна при тепловой обработке в установке контактного типа / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Научное обеспечение развития АПК в современных условиях: материалы Всероссийской научно-практической конференции, т. 3. - Ижевск: Ижевская ГСХА, 2011, с. 31...34.

35. Сутягин С.А. К вопросу о продолжительности сушки / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Материалы III Международной научно-практической конференции «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» / Ульяновск, ГСХА, 2011, т. II, с. 290...292.

36. Сутягин С.А. К вопросу о равномерности движения рабочего органа при сушке зерна в установке контактного типа / В.И. Курдюмов, А.А Павлушин, С.А. Сутягин // Материалы III Международной научно-практической конференции «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» / Ульяновск, ГСХА, 2011, т. II, с. 298...302.

Подписано в печать _____ 2012 г.

Формат 60x84^{1/16}

Бумага типогр.

Гарнитура Times New Roman

Усл. печ. л. 1,0

Тираж - 100 экз.

Заказ №

432980 г. Ульяновск, б. Новый Венец, 1