

На правах рукописи



Тельпук Михаил Борисович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ
ЗЕРНА ПОСЛЕ СУШКИ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ОХЛАДИТЕЛЯ**

Специальность 05.20.01 - Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Великолукская государственная сельскохозяйственная академия»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Морозов Владимир Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Новиков Михаил Алексеевич

кандидат технических наук, доцент
Перекопский Александр Николаевич

Ведущая организация: ФГОУ ВПО Смоленская ГСХА

Защита состоится « 7 » июля 2011 года в 9⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 006.054.01 при Государственном научном учреждении «Северо-Западный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук» по адресу: 196625, Санкт-Петербург, Тярлево, Филтровское шоссе, 3, факс (812) 466-56-66, e-mail: nii@sp.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии

Автореферат разослан « 3 » июня 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черей Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Высокий уровень потерь зерна на всех этапах производства, начиная от возделывания и заканчивая послеуборочной обработкой, оказывает негативное влияние на объемы и экономику зернового хозяйства. Необходимо совершенствование использования материально-технической базы на этапе послеуборочной обработки зерна, так как потери при обработке превышают в 2-3 раза потери при уборке. По имеющимся данным в структуре общих затрат доля на послеуборочную обработку составляет 30...60%, а в структуре себестоимости до 40%. Своевременная и качественная обработка зерна один из путей сокращения его потерь, улучшения семенных, продовольственных и фуражных качеств.

Одной из важных и ответственных операций послеуборочной обработки зерна является его сушка. К современному зерносушильному оборудованию предъявляются серьезные требования в отношении эффективного охлаждения зерна после сушки в целях предотвращения самовозгорания просушенного зерна и снижения его качественных показателей при дальнейшем хранении. Проведенный анализ показал, что большинство из применяемых охладительных устройств не обеспечивают охлаждение нагретого материала в соответствии с агротехническими требованиями. Поэтому исследования направленные на поиск путей повышения эффективности охлаждения зерна после сушки имеют актуальное значение.

Работа выполнена в соответствии с программой фундаментальных и приоритетных прикладных исследований по научному обеспечению развития агропромышленного комплекса Северо-Запада РФ на 2006-2010 гг. и планом НИР ФГОУ ВПО «Великолукская ГСХА» на 2010-2014 гг. по региональным научно-техническим проектам по теме №3 «Повышение эффективности сушки и охлаждения зерна и мелкосеменных культур на очистительно сушильных комплексах в условиях Северо-Запада РФ путем совершенствования технологических процессов и основных рабочих органов».

Цель исследований. Повышение эффективности охлаждения зерна после сушки в условиях Северо-Западного региона России путем совершенствования конструктивных и технологических параметров охладителя аэродинамического типа.

Объект исследования. Технологический процесс охлаждения зерна в условиях псевдооживленного слоя.

Предмет исследования. Аэродинамический охладитель зерна после сушки.

Научная новизна. Разработана математическая модель процесса охлаждения зерна после сушки в аэродинамическом охладителе, получены математические модели для производительности охладителя по зерну и удельных энергозатрат. Определены рациональные параметры и режимы работы аэродинамического охладителя.

Практическая значимость. Разработана и обоснована конструктивно - технологическая схема аэродинамического охладителя зерна после сушки. На основании теоретических и экспериментальных исследований определены рациональные параметры и режимы работы охладителя. Внедрение разработанного аэродинамического охладителя способствует повышению качества выполняемого технологического процесса: снижению потерь зернового материала в процессе послеуборочной обработки; снижению времени и энергозатрат требуемых для охлаждения зерна.

Основные положения, выносимые на защиту:

- конструктивно-технологическая схема аэродинамического охладителя;
- аналитические зависимости для определения конструктивных и технологических параметров аэродинамического охладителя;
- математические модели процесса охлаждения зерна;
- рациональные параметры и режимы работы аэродинамического охладителя;
- результаты испытаний аэродинамического охладителя с применением в качестве агента охлаждения искусственно охлажденного воздуха и его технико-экономическая оценка.

Реализация результатов. По результатам исследований во ФГОУ ВПО «Великолукской ГСХА» был изготовлен опытный образец аэродинамического охладителя зерна производительностью по зерну до 5 т/ч с применением воздухоохладителя, который прошел испытания в СПК «Красное знамя» Новосокольнического района Псковской области.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на 60-ой международной научно-практической конференции в ФГОУ ВПО «Костромской ГСХА» (2009 г.); международной научно-практической конференции «Научное обеспечение агропромышленного производства» в «Курской ГСХА» (2010 г.); V международной научно-практической конференции «Вклад молодых учёных в развитие науки» в «Великолукской ГСХА» (2010 г.).

Публикации. По материалам исследований опубликовано 5 печатных работ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных источников из 125 наименований. Диссертация изложена на 184 машинописных страницах, содержит 33 рисунка, 6 таблиц и 33 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования» проведен обзор и анализ существующих способов и технических средств для охлаждения

зерна после сушки, рассмотрены и проанализированы пути повышения эффективности работы охладительных устройств.

По данным авторов Е.М. Зимина, М.С. Волхонова, В.Ф. Сорочинского, А.А. Боронцова, И.Б. Зимина, П.В. Блохина, Е.А. Дмитрука, С.А. Полозова, Е.П. Румянцевой, Н.П. Сычугова, О.М. Тодэс, В.С. Уколова, Н.П. Черняева, А.С. Ширяева и др. охлаждение зерна предлагается проводить в подвижном или псевдооживленном слое, интенсивность теплообмена в данном случае в 4 раза больше, чем при прохождении газов через неподвижный слой, и в 13 раз выше, чем при внешнем омывании неподвижного слоя газами, коэффициент теплоотдачи в установках с подвижным слоем в 20...30 раз выше по сравнению с установками, работающими с плотным слоем материала.

В соответствии с поставленной целью определены задачи исследований:

- выявить рациональные пути повышения эффективности охлаждения зернового материала после сушки;
- получить аналитические зависимости для определения конструктивных и технологических параметров аэродинамического охладителя;
- получить математические модели процесса охлаждения зерна после сушки;
- обосновать рациональные параметры и режимы работы аэродинамического охладителя;
- провести экспериментальные испытания и дать технико-экономическую оценку полученных результатов.

Во второй главе «Теоретические предпосылки к определению конструктивных и технологических параметров аэродинамического охладителя зерна» обоснованы рациональные параметры и режимы работы аэродинамического охладителя, получены математические модели движения и охлаждения зерна в охладителе.

Для эффективного охлаждения зерна необходимо, чтобы количество тепла, отданного зерном за определенное время, было равно изменению энтальпии агента охлаждения за то же время. Математически отмеченное правило можно выразить в виде уравнения теплового баланса:

$$-G_{\text{аэр}} c_z (t_{\text{з.н.}} - t_{\text{з.к.}}) = Q \rho_v c_v (t_{\text{охл.к.}} - t_{\text{охл.н.}}), \quad (1)$$

где $G_{\text{аэр}}$ - пропускная способность аэродинамического транспортера, кг/с;
 c_z, c_v - теплоемкость соответственно охлаждаемого зерна и агента охлаждения, ккал/ (кг °С); $t_{\text{з.н.}}, t_{\text{з.к.}}$ - соответственно начальная (после сушки) и конечная (после охлаждения) температура зерновой массы, °С; $t_{\text{охл.н.}}, t_{\text{охл.к.}}$ - температура агента охлаждения соответственно на входе в зерновую массу и выходе из нее, °С; Q - расход воздуха на охлаждение зерна в аэродинамическом транспортере, м³/с; ρ_v - плотность воздуха, кг/м³.

Величину пропускной способности можно определить по формуле:

$$G_{\text{аэр}} = \frac{M_z}{\tau_{\text{тр.}}} = \frac{M_z}{\tau_{\text{охл.}}}, \quad (2)$$

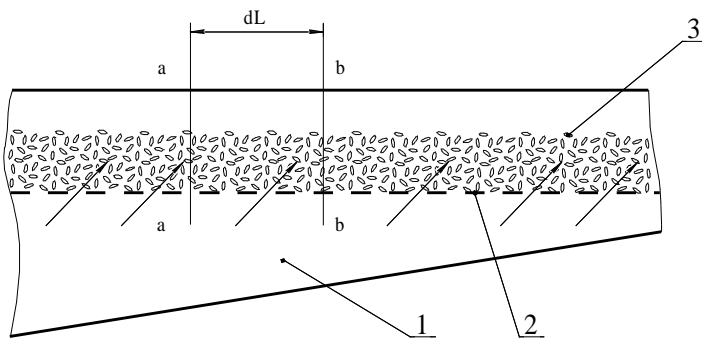
где M_z – масса зерна, подвергаемого охлаждению, кг; τ_{mp} – время транспортирования зерна, с; $\tau_{охл}$ – время охлаждения зерна, с.

Согласно методике, предложенной профессором Е.М. Зиминим, расход воздуха в аэродинамическом охладителе определяется по формуле:

$$Q = v_{cp} \frac{L_{zр} h_{щ} c R \pi}{2t}, \quad (3)$$

где v_{cp} – средняя скорость выхода воздушного потока из щели газораспределительной решетки аэродинамического охладителя, м/с; $L_{zр}$ – длина газораспределительной решетки, м; $h_{щ}$ – высота щели газораспределительной решетки, м; R – радиус изгиба лопатки – жалюзи газораспределительной решетки, м; c – коэффициент отгиба жалюзийной пластины решетки, определяемый из выражения.

Технологическая схема процесса охлаждения зерна в аэродинамическом охладителе представлена на рисунке 1.



- 1 – нагнетательный канал;
- 2 – газораспределительная решетка;
- 3 – охлаждаемый зерновой слой

Рисунок 1 – Технологическая схема процесса охлаждения зерна в аэродинамическом охладителе.

Выделив на участке газораспределительной решетки аэродинамического транспортера элементарный объем, занимаемый охлаждаемым зерновым слоем и ограниченный плоскостями а-а и б-б, определим массу зерна, подвергаемого охлаждению и занимающего элементарный объем:

$$M_z = L_{zр} F_{сл} \rho_z (1 - \varepsilon_{cp}), \quad (4)$$

где $F_{сл}$ – площадь поперечного сечения транспортного канала, занятая зерновым слоем, м²; ρ_z – плотность зерна, кг/м³; ε_{cp} – порозность псевдооживленного зернового слоя.

Используя положения теории аэродинамических транспортеров, введем в расчет понятие – коэффициент “живого” сечения газораспределительной решетки (ψ), который представляет собой соотношение:

$$\psi = \frac{\sum F_{щ}}{F_{zр}} = \frac{L_{zр} h_{щ} c R \pi}{t L_{zр} R \pi} = \frac{h_{щ} c}{t}, \quad (5)$$

где $F_{zр}$ – площадь рабочей части газораспределительной решетки, м².

Представив уравнение теплового баланса в дифференциальной форме, получим:

$$-dL_{2p} \cdot F_{cl} \rho_3 (1 - \varepsilon_{cp}) c_3 (t_{3.н.} - t_{3.к.}) = dL_{2p} \cdot \psi \frac{\pi R}{2} v_{cp} \rho_6 c_6 (t_{охл.к.} - t_{охл.н.}) d\tau_{охл.} \quad (6)$$

Примем допущение - температура агента охлаждения на выходе из зернового слоя равна

$$t_{охл.к.} = t_3 \cdot K_{то} \quad (7)$$

где $K_{то}$ – коэффициент определяющий влияние условий на интенсивность теплообмена.

В левой части выражения (6) обозначим разность $t_{3.н.} - t_{3.к.} = dt$, т.к. dt представляет собой изменение температуры зерна за время $d\tau_{охл.}$. С учетом величины dt запишем выражение (6) в виде:

На основании принятого уравнение теплового баланса преобразуется в виде:

$$-\left(\frac{dt}{t_3 \cdot K_{то} - t_{охл.н.}} \right) = \frac{\psi \frac{\pi R}{2} v_{cp} \rho_6 c_6}{F_{cl} \rho_3 (1 - \varepsilon_{cp}) c_3} d\tau_{охл.} \quad (8)$$

Полученное уравнение описывает кинетику охлаждения зерновой массы при перемещении ее в аэродинамическом охладителе.

Интегрируя данное выражение, получим уравнение температурной кривой для процесса охлаждения зерна в аэродинамическом охладителе:

$$t_3 = K_{то} \cdot \left(t_{охл.н.} + (t_{3.н.} - t_{охл.н.}) \ell \frac{\psi \frac{\pi R}{2} v_{cp} \rho_6 c_6}{F_{cl} \rho_3 (1 - \varepsilon_{cp}) c_3} \tau_{охл.} \right) \quad (9)$$

Введем постоянную K_3 характеризующую свойства охлаждаемой культуры

$$\frac{\pi \cdot \rho_6 c_6}{2 \rho_3 (\varepsilon_{cp} - 1) c_3} = K_3 \quad (10)$$

Тогда продолжительность процесса охлаждения зерна определим как

$$\tau_{охл.} = \frac{Ln \frac{(t_3 \cdot K_{то} - t_{охл.н.}) \cdot F_{cl}}{(t_{3.н.} - t_{охл.н.})}}{\psi \cdot R \cdot v_{cp} \cdot K_3} \quad (11)$$

Полученные зависимости позволяют судить о том, что процесс охлаждения зерна на аэродинамическом транспортере подчиняется экспоненциальному закону.

В результате анализа зависимостей установлено, что с уменьшением температуры агента охлаждения интенсивность снижения температуры зерновок

повышается. В случае использования жалюзи газораспределительной решетки криволинейной формы процесс охлаждения протекает более интенсивно.

Перемещение зерна происходит в грузонесущем канале аэродинамического охладителя (рисунок 2), а так же в отводе (криволинейный участок с углом поворота 90°). Основными конструктивными параметрами грузонесущего канала являются: длина грузонесущего канала - L , размеры поперечного сечения грузонесущего канала, угол наклона лопатки газораспределительной - a и угол отвода - φ .

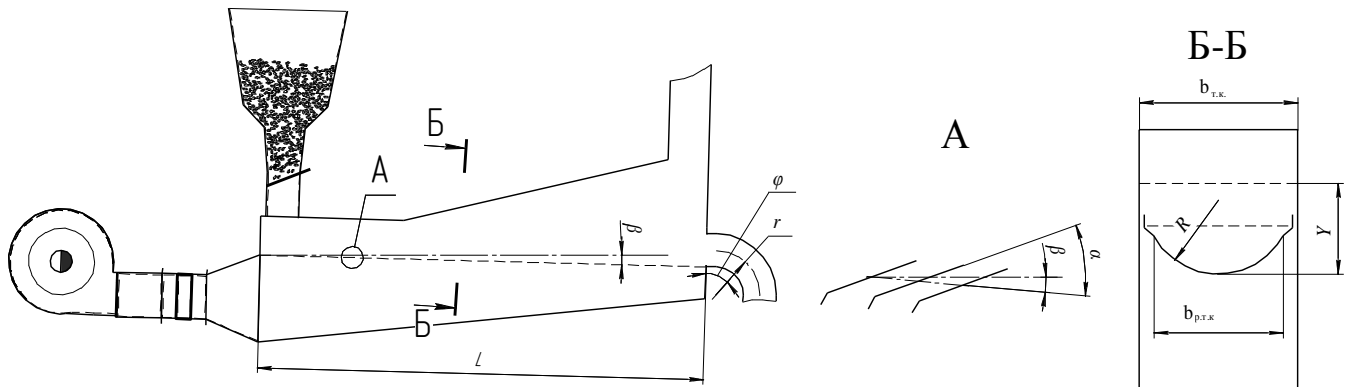


Рисунок 2 Схема для определения основных конструктивных параметров грузонесущего канала.

Представим зерно, находящееся в воздушном потоке, создаваемом системой аэрации аэрожелоба, как материальную частицу, перемещающуюся под воздействием силы воздушного потока $F_{в.п.}$ и силы тяжести G . С учетом принятых обозначений схема сил, действующих на зерновку в грузонесущем канале изображена на рисунке 3.

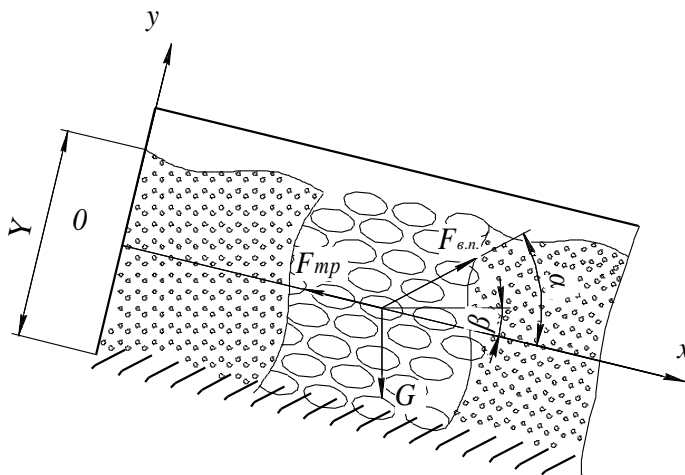


Рисунок 3 - Схема сил, действующих на зерновку в грузонесущем канале:

- W_x - сила сопротивления движению частицы в воздушном потоке по оси OX ;
- W_y - сила сопротивления движению частицы в воздушном потоке по оси OY ;
- $F_{в.п.}$ - сила воздействия воздушного потока;
- $F_{т.п.}$ - сила трения при скольжении зерна по зерну;
- G -сила тяжести зерновки.

Для математического описания процесса перемещения используем уравнения:

$$\frac{dv_x}{d\tau_{mp}} = \frac{g}{v^2} (v_{cp} - v_x)^2 - g \cdot \sin a \quad (12)$$

$$\frac{dv_y}{d\tau_{mp}} = -\frac{g}{v^2}(v_{cp} - v_x) \cdot v_y - g \cdot \cos a \quad (13)$$

где g - ускорение силы тяжести; v_x - скорость зерна вдоль длины грузонесущего канала (вдоль оси ОХ); v_y - скорость зерна, направленная перпендикулярно оси ОХ грузонесущего канала; v_{cp} - скорость воздушного потока; v - скорость воздушного потока необходимая для начала движения зерна.

Интегрирование уравнений (12) и (13) выполняем, полагая, что при $\tau_{mp} = 0, v_{cp} = 0$

$$v_x = v_{cp} - v \cdot \sqrt{\sin a} \cdot cthm(m + \tau) \quad (14)$$

$$\text{где } m = \frac{g \cdot \sqrt{\sin a}}{v}, \quad \tau = \frac{1}{m} \text{Arth} \frac{v_{cp} - v_x}{v}.$$

Полагая при $\tau_{mp} = 0, v_y = b$, находим:

$$b = \frac{C}{shm\tau} - \frac{g \cdot \cos a}{m} cthm\tau \quad (15)$$

$$v_y = \frac{dy}{d\tau_{mp}} = \frac{b \cdot shm\tau}{shm(\tau_{mp} + \tau)} + \frac{g \cdot \cos a}{m} [cthм\tau - cthм(\tau_{mp} + \tau)] \quad (16)$$

Интегрируя выражение (14) от 0 до L находим, что длина грузонесущего канала определяется по формуле:

$$L = v_{cp} \tau_{mp} - \frac{v \cdot \sqrt{\sin a}}{m} \ln \frac{shm(\tau_{mp} + \tau)}{shm\tau} \quad (17)$$

Полагая при $\tau_{mp} = 0, y = y_0$, высота зернового слоя рассчитывается по формуле:

$$Y = \frac{1}{m} \ln \frac{tg \frac{m(\tau_{mp} + \tau)}{2}}{tg \frac{m\tau}{2}} - \frac{g \cdot \cos a}{m^2} \ln \frac{shm(\tau_{mp} + \tau)}{shm\tau} + \frac{tg \cos a}{m} cthm\tau \quad (18)$$

Площадь F_{cl} определим как

$$F_{cl} = b_{p.m.k.} \cdot \left(Y - \sqrt{\frac{\pi R \arcsin \frac{b_{p.m.k.}}{2R}}{180} \left(\frac{\pi R \arcsin \frac{b_{p.m.k.}}{2R}}{180} \right)^2 - b_{p.m.k.}^2} \right) + R^2 \frac{\pi}{180} \arcsin \frac{b_{p.m.k.}}{2R} - \frac{R b_{p.m.k.}}{4} \quad (19)$$

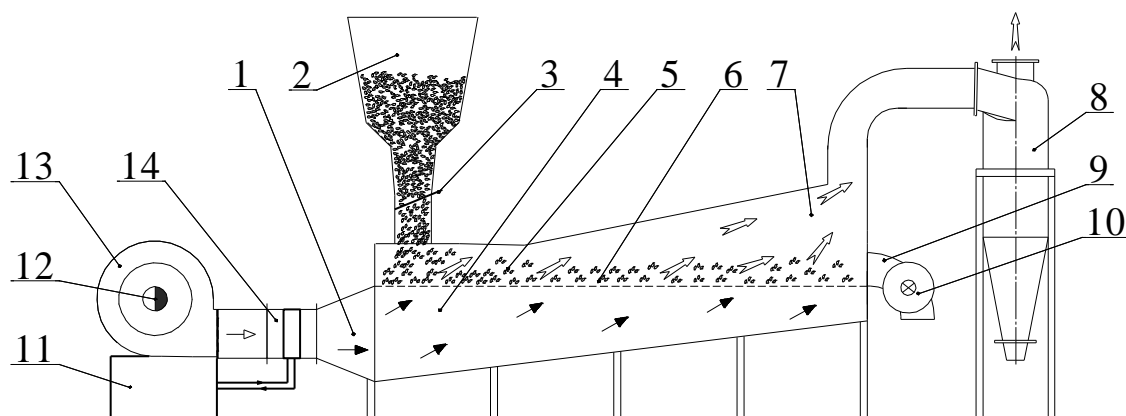
Математическая модель процесса перемещения зерна позволяет определять оптимальные параметры грузонесущего канала. При численном решении полученных уравнений можно описать работу аэродинамического охладителя в переходных и стационарных режимах.

В результате теоретического исследования кинетики процесса охлаждения зерна после сушки выявлены следующие пути интенсификации:

- снижение температуры агента охлаждения;
- использование жалюзи газораспределительной решетки криволинейной формы;
- увеличение коэффициента живого сечения газораспределительной решетки до допустимых значений, обусловленных размерами зерна;
- увеличение радиуса вогнутости газораспределительной решетки криволинейной формы до допустимых значений, обусловленных углом трения для зерновой массы. При значениях радиуса вогнутости свыше 350 мм возможно нарушение режимов работы аэродинамического охладителя.

Наряду с отмеченным представлена методика расчета охлаждения зерна на аэродинамическом транспортере имеет важное значение для практики, так как позволяет на этапе разработки компоновочной схемы аэродинамического охладителя зерна после сушки наиболее обоснованно подойти к выбору одного из важных конструктивных параметров – длины газораспределительной решетки, от которой в значительной мере зависит обеспечение требуемой эффективности охлаждения зерновой массы.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» изложена программа экспериментальных исследований, описана экспериментальная установка, приведены методики проведения и обработки результатов экспериментальных исследований. Охладитель работает следующим образом: нагретое зерно подается из бункера в грузонесущий канал аэрожелоба, где охлажденный кондиционированный воздух охлаждает зерно при одновременном его смещении к выгрузному органу (рисунок 4).



—▷ - наружный воздух; ≧≧ - отработавший воздушный поток;

—▶ - агент охлаждения, искусственно охлажденный воздух

1 – конфузор; 2 – бункер; 3 – заслонка; 4 – нагнетательный канал; 5 – грузонесущий канал; 6 – газораспределительная решетка; 7 – конфузор; 8 – циклон; 9 – выгрузной лоток; 10 – дозатор зерна; 11 – холодильная машина; 12 – заслонка; 13 – вентилятор; 14 – переходной патрубок.

Рисунок 4 – Технологическая схема аэродинамического охладителя зерна.

Теоретические исследования и поисковые опыты, а также анализ научной литературы позволили сделать выбор факторов необходимых для исследования процесса охлаждения зерна:

1. Расход агента охлаждения
2. Температуру агента охлаждения
3. Частоту вращения выпускного устройства

Расход агента охлаждения – это фактор, от изменения которого будет зависеть в наибольшей степени не только процесс охлаждения, но и транспортирования зернового материала в аэродинамическом охладителе. При уменьшении расхода агента охлаждения до определенного предела транспортирование зерна может стать неустойчивым, или прекратится вообще, а охлаждение не соответствовать агротехническим требованиям. С чрезмерным увеличением расхода агента охлаждения процесс транспортирования так же будет нарушен, а затраты на охлаждение не оправданы. Расход агента охлаждения изменялся в пределах $1 \dots 3 \text{ м}^3/\text{с}$

Так как температура агента охлаждения является одним из основных факторов, влияющим на процесс охлаждения зерна, температуру агента охлаждения изменяли в пределах $4 \dots 18 \text{ }^\circ\text{C}$, за счет установленного в переходном патрубке воздухоохладителя. Значение температуры определяли посредством термопреобразователей, установленных в переходном патрубке за воздухоохладителем по ходу движения воздушного потока.

Частота вращения выпускного устройства влияет на степень заполнения зерновым материалом грузонесущего канала аэродинамического охладителя. При большей частоте вращения зерновая насыпь не испытывает дополнительного сопротивления в виде выпускного устройства, как следствие высота зернового слоя имеет меньшие значения. Частоту вращения выпускного устройства регулировали в пределах $5 \dots 25 \text{ мин}^{-1}$ набором сменных шкивов клиноременной передачи.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались с помощью пакетов прикладных программ: Microsoft Office Excel 2007, STATGRAPHICS Plus 5.1 Enterprise Edition.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований процесса охлаждения зерна в аэродинамическом охладителе» приведены результаты экспериментальных исследований процесса охлаждения.

После проведения многофакторного регрессионного анализа, без учета незначимых эффектов, установлена зависимость производительности охладителя по зерну от факторов Q , n :

$$G = 0,67 + 0,08 \cdot Q + 0,49 \cdot n + 0,04 \cdot Q \cdot n + 0,02 \cdot Q^2 + 0,02 \cdot n^2 \quad (20)$$

где G – пропускная способность аэродинамического охладителя по зерну, кг/с; θ – температура охлажденного зерна, $^\circ\text{C}$; Q – расход агента охлаждения $\text{м}^3/\text{с}$; n – частота вращения выпускного устройства, мин^{-1} .

Отмечаем повышение производительности охладителя по зерну с повышением расхода агента охлаждения и частоты вращения выпускного устрой-

ва (рисунок 5). В большей степени на производительность оказывает влияние повышение частоты вращения выпускного устройства.

Наибольшая производительность аэродинамического охладителя по зерну наблюдается при расходе агента охлаждения $3 \text{ м}^3/\text{с}$ и частоте вращения ротора выпускного устройства 25 мин^{-1} . При расходе агента охлаждения $1 \dots 1,5 \text{ м}^3/\text{с}$ максимальная производительность по зерну составит $1,1 \text{ кг/с}$ при частоте вращения ротора выпускного устройства 25 мин^{-1} .

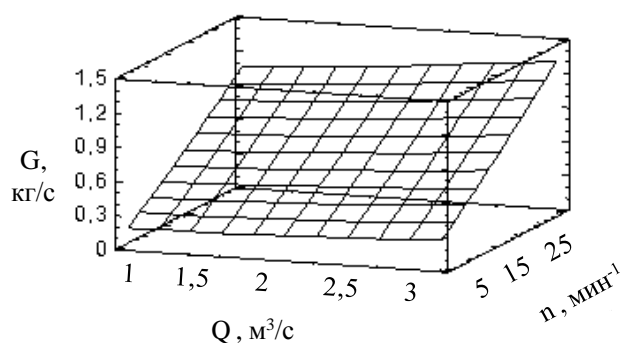


Рисунок 5 - Зависимость пропускной способности от расхода агента охлаждения и частоты вращения выпускного устройства.

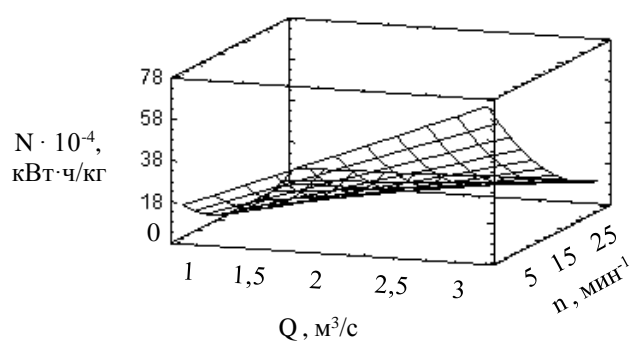


Рисунок 6 - Зависимость удельных энергозатрат от расхода агента охлаждения и частоты вращения ротора выпускного устройства

Для оценки энергозатрат процесса перемещения зерна установлена зависимость удельных энергозатрат на транспортирование зерна от расхода агента охлаждения и частоты вращения ротора выпускного устройства:

$$N = 1,44 \cdot 10^{-3} + 1,54 \cdot 10^{-3} \cdot Q - 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot n - 1,35 \cdot 10^{-3} \cdot Q \cdot n + 1,21 \cdot 10^{-3} \cdot n^2 \quad (21)$$

где N – удельные энергозатраты на перемещение зерна, кВт·ч/кг; t – температура агента охлаждения, °С.

Удельные энергозатраты увеличиваются с повышением расхода агента охлаждения (рисунок 6), что обусловлено особенностью работы вентилятора, так как с увеличением количества нагнетаемого воздуха происходит повышение аэродинамического сопротивления охладителя в целом, что влечет большие энергозатраты для обеспечения требуемого количества агента охлаждения. В свою очередь повышение частоты вращения ротора выпускного устройства способствует снижению энергоемкости процесса. Так при расходе агента охлаждения $3 \text{ м}^3/\text{с}$ удельные энергозатраты составляют $7,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ для частоты вращения ротора выпускного устройства 5 мин^{-1} , а при 25 мин^{-1} энергозатраты составят уже $1,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$. Данное влияние частоты вращения ротора выпускного устройства обусловлено повышением производительности по зерну аэродинамического охладителя, как следствие удельные энергозатраты снижаются.

После проведения многофакторного регрессионного анализа, без учета незначимых эффектов, установлена зависимость температуры отработавшего агента охлаждения от факторов Q , t , n :

для семенного зерна

$$\theta_{\text{охл.к.}} = 22,53 - 2,95 \cdot Q + 2,95 \cdot n + 5,43 \cdot t - 0,5 \cdot Q \cdot n + 1,65 \cdot Q \cdot t + 0,27 \cdot n \cdot t + 1,39 \cdot Q^2 - 0,48 \cdot n^2 + 0,17 \cdot t^2 \quad (22)$$

для фуражного

$$\theta_{\text{охл.к.}} = 26,76 - 4,61 \cdot Q + 4,61 \cdot n + 7,68 \cdot t - 0,97 \cdot Q \cdot n + 1,65 \cdot Q \cdot t + 0,27 \cdot n \cdot t + 4,72 \cdot Q^2 + 1,29 \cdot n^2 + 2,42 \cdot t^2 \quad (23)$$

где $\theta_{\text{охл.к.}}$ - температура обработавшего агента охлаждения, °С.

Наибольшее влияние на исследуемый параметр оказывает температура и расход агента охлаждения (рисунок 7).

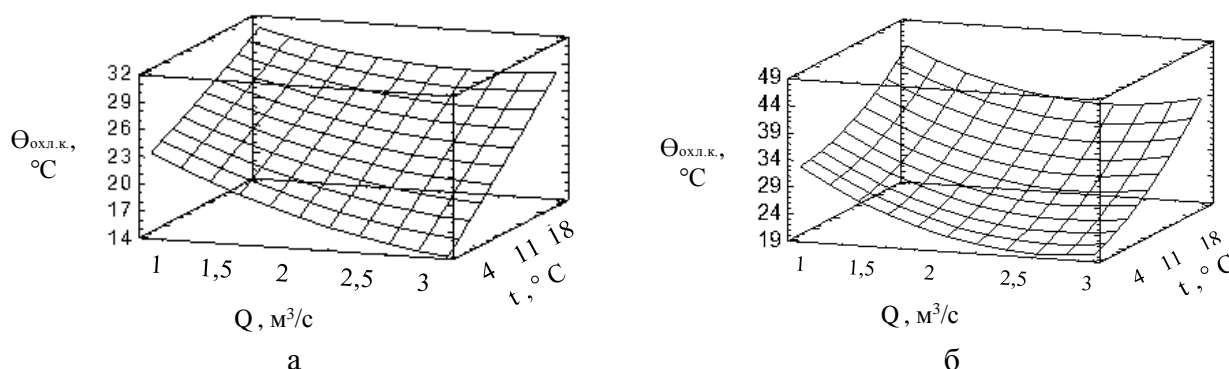


Рисунок 7 - Зависимость температуры обработавшего агента охлаждения от расхода и температуры агента охлаждения: а – семенное зерно; б - фуражное зерно.

С повышением начальной температуры агента охлаждения пропорционально возрастает и его температура после прохождения через зерновую массу. При повышении расхода агента охлаждения температура обработавшего агента охлаждения снижается. Важно отметить то что во всем исследуемом диапазоне значений факторов температура обработавшего агента охлаждения всегда значительно превышала начальную температуру агента охлаждения, а при его температуре свыше 11 °С и температуру окружающего воздуха равную 17 °С. Так при температуре агента охлаждения 18 °С при охлаждении семенного зерна температура обработавшего агента охлаждения находилась в пределах 28...31 °С, а при охлаждении фуражного зерна 39...44 °С. Следовательно использование обработавшего агента охлаждения повторно не является целесообразным, как в случае с сушкой зерна. Однако такую возможность стоит иметь ввиду как один из путей снижения энергоёмкости при следующих параметрах: температуре агента охлаждения ниже 5...8 °С; расходе агента охлаждения свыше 2 м³/с. Более высокая температура агента охлаждения на выходе из зернового слоя говорит об более эффективном использовании агента охлаждения для отвода тепла.

Однако главным критерием для оценки охладительных устройств является соответствие предъявляемым требованиям температуры охлажденного зерна. После проведения многофакторного регрессионного анализа, без учета незна-

чимых эффектов, установлена зависимость температуры зерна после охлаждения от факторов Q , t , n :

для семенного зерна

$$\theta = 22,53 - 2,95625 \cdot Q + 2,95 \cdot n + 5,43 \cdot t - 0,5 \cdot Q \cdot n + 1,65 \cdot Q \cdot t + 0,27 \cdot n \cdot t + 1,39 \cdot Q^2 - 0,47 \cdot n^2 + 0,17 \cdot t^2 \quad (24)$$

для фуражного

$$\theta = 25,76 - 8,58 \cdot Q + 0,4 \cdot n + 6,93 \cdot t - 0,97 \cdot Q \cdot n + 1,15 \cdot Q \cdot t + 0,27 \cdot n \cdot t + 4,46 \cdot Q^2 - 1,54 \cdot n^2 - 2,16 \cdot t^2 \quad (25)$$

где θ - температура охлажденного зерна, °С.

Наибольшее влияние на температуру охлажденного зерна оказывают расход и температура агента охлаждения, как в случае охлаждения семенного, так и фуражного зерна. Установлена прямо пропорциональная зависимость температуры охлажденного зерна с температурой агента охлаждения. При повышении расхода агента охлаждения конечная температура охлажденного зерна также снижается. Так при температуре наружного воздуха 17 °С в период уборки зерновых температура охлажденного зерна в соответствии с агротехническими требованиями не должна превышать 25 °С. В случае охлаждения семенного зерна (рисунок 8) при расходе агента охлаждения 1...1,5 м³/с его температура должна быть не более 4...11 °С. В случае охлаждения семенного зерна при температуре агента охлаждения равной 18 °С расход агента охлаждения не должен быть менее 2,2 м³/с. В случае охлаждения фуражного зерна при температуре агента охлаждения 18 °С охлаждаемое зерно не соответствовало агротехническим требованиям по температуре для всего диапазона расхода агента охлаждения (рисунок 8).

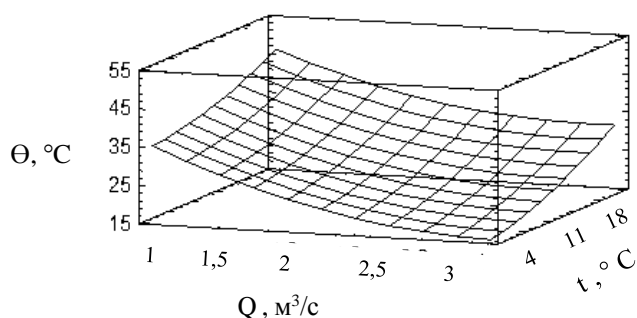


Рисунок 8 - Зависимость температуры охлажденного фуражного зерна от расхода и температуры агента охлаждения.

При расходе агента охлаждения 3 м³/с зерно соответствовало требованиям лишь при температуре агента охлаждения не превышающей 14 °С. При снижении расхода агента охлаждения температура зерна возрастает, так при 2 м³/с она превысила требуемую на 4 °С, а при 1 м³/с на 16 °С. Для обеспечения требуемой температуры зерна необходимо проводить охлаждение при расходе агента охлаждения более 1,3...1,4 м³/с.

Выявлено совместное влияние расхода агента охлаждения и частоты вращения ротора выпускного устройства. Так для обеспечения более низкой

температуры охлажденного фуражного зерна при неизменном расходе и температуре агента охлаждения необходимо при расходе агента охлаждения более 2 м³/с частоту вращения равную 13...17 мин⁻¹, а при меньшем расходе агента охлаждения равную 5...15 мин⁻¹.

Данный эффект объясним тем что при меньшем расходе с повышением частоты вращения ротора выпускного устройства продолжительность охлаждения зерна снижается, как следствие его конечная температура имеет большие значения. При значительном расходе агента охлаждения равном 2...3 м³/с снижение частоты вращения ротора выпускного устройства способствует увеличению высоты зернового слоя что очевидно приводит к снижению интенсивности теплообмена. Однако стоит отметить что при расходе агента охлаждения 1 м³/с разница температуры охлажденного зерна при изменении частоты вращения ротора выпускного устройства составляет 1...2,5 °С, при расходе 3 м³/с данная разница составляет 1...1,5 °С. Поэтому в силу значительного влияния частоты вращения ротора выпускного устройства на производительность аэродинамического охладителя, данной возможностью повышения интенсивности процесса охлаждения стоит пренебречь.

Однако для определения оптимальных параметров охладителя необходимо рассматривать все полученные модели как единую систему. Для комплексного анализа эффективности рабочего процесса аэродинамического охладителя в исследуемой области факторов произведено исследование полученных математических моделей с помощью надстройки Microsoft Office Excel 2007 «Поиск решений». Данная надстройка позволяет находить рациональные решения для полученных математических моделей процесса.

Для анализа использовались математические модели энергозатрат процесса, температуры охлажденного зерна, коэффициента эффективности охлаждения для фуражного и семенного зерна. При поиске оптимальных значений факторов были заданы ограничения: температура охлажденного зерна не должна превышать более чем на 8 °С температуру окружающего воздуха равную 17 °С; необходимая производительность по зерну 4 т/ч. В качестве определяющего параметра было определено отношение удельных энергозатрат к коэффициенту эффективности охлаждения. Математическая модель исследовалась для получения минимально возможного значения целевого параметра.

В результате исследования кинетики охлаждения зерна установлена зависимость коэффициента $K_{то}$ от средней скорости агента охлаждения и его начальной температуры. После проведения многофакторного регрессионного анализа, без учета незначимых эффектов, были получены уравнения регрессии:

для семенного зерна

$$K_{mo} = 1,03 - 0,008 \cdot t_{ox} + 0,058 \cdot v_{cp} - 0,002 \cdot t_{ox} \cdot v_{cp} + 0,0004 \cdot t_{ox}^2 - 0,003 \cdot v_{cp}^2 \quad (26)$$

для фуражного

$$K_{mo} = 0,96 - 0,003 \cdot t_{ox} + 0,096 \cdot v_{cp} - 0,002 \cdot t_{ox} \cdot v_{cp} + 0,0002 \cdot t_{ox}^2 - 0,006 \cdot v_{cp}^2 \quad (27)$$

где t_{ox} - начальная температура агента охлаждения, °С;

v_{cp} – средняя скорость выхода агента охлаждения из щели газораспределительной решетки, м/с.

Анализируя полученные математические модели делаем вывод о наибольшем влиянии на процесс охлаждения температуры агента охлаждения. С повышением его температуры различия между фактической температурой зерна и теоритической снижаются (рисунок 9). При увеличении скорости фильтрации агента охлаждения погрешность так же возрастает, так при температуре агента охлаждения 18 °С при увеличении скорости фильтрации с 0,56 м/с до 1 м/с погрешность возрастает с 5 до 10 %. При дальнейшем увеличении скорости агента охлаждения погрешность остается на том же уровне. При снижении температуры агента охлаждения до 4 °С при скорости агента охлаждения 0,56 м/с погрешность составит 12 %, а при скорости 1,73 м/с составит 25 %.

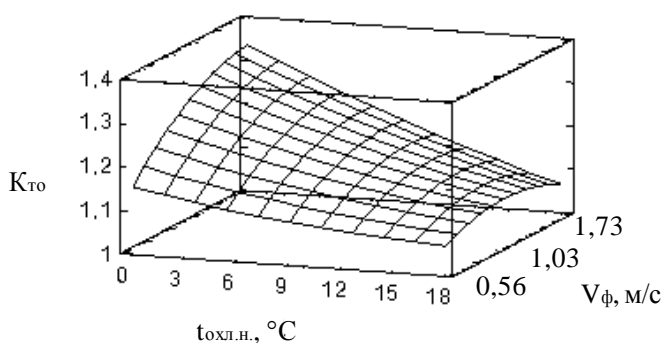


Рисунок 9 - Зависимость коэффициента $K_{то}$ от средней скорости фильтрации агента охлаждения и его начальной температуры при охлаждении фуражного зерна.

Полученные уравнения возможно использовать для определения коэффициента $K_{то}$, определяющего влияние условий теплообмена, при расчете температуры зерна в зависимости от технологических и конструктивных параметров аэродинамического охладителя.

Главной целью механизированных комплексов и поточных линий в процессе послеуборочной обработки является доведение зерна до требуемых кондиций в зависимости от его назначения. Более жесткие требования предъявляются, естественно, к семенному материалу, который подразделяется на три класса. Семена 1 и 2 класса предназначены для семенных и общих посевов, а семена 3 класса рекомендуются использовать только для общих посевов. На этапе производственных исследований, нами были проведены дополнительные исследования, направленные на изучение влияния режимных параметров экспериментальной установки на качественные показатели семян: всхожесть и энергию прорастания. Результаты, полученные после проведения анализов по определению качественных показателей семян указывают на отсутствие снижения качественных показателей вследствие интенсивного охлаждения зерна, а так же снижение качественных показателей при отсутствии охлаждения просушенного зерна. Качественные показатели всхожести и энергии прорастания при отсутствии операции охлаждения снизились по сравнению с охлажденным зерном в ряде случаев до 15 %. Часть зерна, не подвергнутого охлаждению после сушки соответствует требованиям предъявляемым к семенному материалу 3 класса, а следова-

тельно может быть использовано лишь для посевов общего назначения. Качество охлажденного зерна по всхожести и влажности соответствует ГОСТ Р - 52328 - 2005 по Псковской области.

Так же проведенные исследования показали, что процесс охлаждения зерновок, при их транспортировании в рассматриваемом агрегате, сопровождается дополнительным съемом влаги с зерновок в пределах 0,7...1,7 % и выравниванием по влажности отдельных зерновок в объеме слоя, что так же благотворно влияет на срок хранения зерна.

В пятой главе «Технико-экономическая эффективность охлаждения зерна после сушки с использованием аэродинамического охладителя» приведены расчеты экономической эффективности от применения разработанного аэродинамического охладителя в сравнении с колонковым охладителем.

Технико-экономическую эффективность использования предлагаемого аэродинамического охладителя при послеуборочной обработке зерна определяли на основании разности приведённых затрат на 1 т зерна при работе базового и предлагаемого охладителя. Экономический эффект от применения аэродинамического охладителя при послеуборочной обработке семенного и продовольственного зерна составил 250 руб./т, что позволяет окупить капиталовложения за 3,66 года.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования процесса охлаждения зерна в подвижном слое на аэродинамическом охладителе позволяют сделать следующие выводы:

1. В Северо-западной зоне Российской Федерации при послеуборочной обработке зерна аэродинамический охладитель, позволяющий проводить охлаждение зерна в псевдооживленном слое с использованием в качестве агента охлаждения охлажденный наружный воздух, расширяет возможности использования оборудования КЗС. Для повышения эффективности процесса охлаждения зерна рекомендуется использовать аэродинамический охладитель в качестве выносного охладительного устройства зерносушилок.

2. Для обоснования конструктивных и технологических параметров аэродинамического охладителя целесообразно использовать разработанные математические модели охлаждения зерна в псевдооживленном слое, позволяющие определить продолжительность охлаждения (11), минимально необходимые значения высоты (18) и длины (17) грузонесущего канала.

3. Для охлаждения зерна после сушки в аэродинамическом охладителе для более рационального использования агента охлаждения целесообразно использовать газораспределительную решетку с радиусом вогнутости 350 мм, максимальной высотой щели 4 мм с шагом по пластинам не более 50 мм. Рекомендуемый диапазон скорости фильтрации агента охлаждения при этом 1...1,34 м/с.

4. Теплоту отработавшего агента сушки более рационально использовать повторно при сушке зерна, нежели для питания теплоиспользующей холодиль-

ной машины при охлаждении воздушного потока, поэтому в качестве источника искусственного холода рекомендуется использовать парокомпрессионную холодильную машину, что так же обусловлено её относительно высоким КПД.

5. Наиболее существенное влияние на процессы перемещения и охлаждения зерна оказывают технологические и конструктивные параметры, рациональные значения которых находятся в следующих пределах: расход агента охлаждения $1,8 \dots 2,34 \text{ м}^3/\text{с}$; температура агента охлаждения $14,5 \dots 15,6 \text{ }^\circ\text{C}$; частота вращения выпускного устройства $23 \dots 25 \text{ мин}^{-1}$. На основании экспериментальных данных получены математические модели процесса охлаждения зерна (20)...(29).

6. Для снижения энергоёмкости процесса сушки зерна целесообразно использовать аэродинамический охладитель в качестве выносного охладительного устройства зерносушилок, так как при охлаждении зерна после сушки происходит снижение влажности зерна на $0,7 \dots 1,7 \%$. Так же охлаждение зерна позволяет повысить качественные показатели зерна: всхожесть и энергию прорастания до 15% .

7. Применение аэродинамического охладителя для охлаждения фуражного и семенного зерна в условиях Северо-западной зоны РФ позволяет снизить эксплуатационные затраты на 68% , срок окупаемости капитальных вложений составляет $3,66$ года при экономическом эффекте $250,5 \text{ руб./т}$ для охлаждения зерна.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Морозов В.В. Перспективы повышения эффективности охлаждения зерна после сушки / В.В. Морозов, И.Б. Зимин, М.Б. Тельпук // Научное обеспечение агропромышленного производства (материалы Международной научно-практической конференции, 20-22 января 2010г., г. Курск ч.3). - Курск: Изд-во Курск. гос. с.-х. ак., 2010. - С. 127-129

2. Зимин И.Б. Кинетика охлаждения зерновой массы при перемещении её на аэродинамическом транспортёре / И.Б. Зимин, М.Б. Тельпук // Техника в сельском хозяйстве. – 2010. - №6. – С. 9-11.

3. Морозов В.В. Повышение эффективности охлаждения фуражного зерна после сушки / В.В. Морозов, И.Б. Зимин, М.Б. Тельпук // Вклад молодых учёных в развитие науки (материалы V международной научно-практической конференции, 8-9 апреля 2010г., г. Великие Луки). – Великие Луки: Изд-во Великолукской гос. с.-х. ак., 2010. . - С. 184-187

4. Морозов. В.В. Охлаждение зерна в аэродинамическом охладителе / В.В. Морозов, М.Б. Тельпук // Сельский механизатор. – 2011. - №5. – С. 10-11.

5. Морозов. В.В. Аэродинамический охладитель / В.В. Морозов, М.Б. Тельпук // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. - №5. – С. 10-11.

Лицензия ЛР № 040831 Подписано к печати 26.05.2011 г.

Формат 60 x 90/16

Усл. печ. 1,3 п.л.

Тираж 100 экз.

Заказ 64

Редакционно-издательский отдел ФГОУ ВПО «ВГСХА»

182100, г. Великие Луки, пл. Ленина, 1

