

На правах рукописи



КУПРЕЕНКО ОЛЕГ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЬНОЙ СУШИЛКИ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ДЛЯ ЗЕРНА**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань, 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ)

Научный руководитель: **Ожерельев Виктор Николаевич**
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Саенко Юрий Васильевич,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный аграрный университет
имени В. Я. Горина», профессор
инженерного факультета

Агеев Петр Сергеевич,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Ульяновский
государственный аграрный университет
имени П.А. Столыпина», доцент кафедры
«Агротехнологии, машины и безопасность
жизнедеятельности»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Федеральный
научный агротехнологический центр ВИМ»
(ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Защита состоится «28» апреля 2026 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.031.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д.1, зал заседаний диссертационного совета

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: <http://rgatu.ru/>, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.gisnauka.ru/>

Автореферат разослан «___» 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор  Юхин Иван Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Перспективным типом сушильных установок в сельскохозяйственном производстве являются сушилки аэродинамического нагрева простые по конструкции, имеющие высокий коэффициент преобразования потребляемой электроэнергии на привод ротора-нагревателя в тепловую энергию сушильного агента.

Особенностью сушилок аэродинамического нагрева является циркуляция сушильного агента по замкнутому контуру с частичным сбросом увлажненного сушильного агента и подсосом такого же количества атмосферного воздуха.

Имеется положительный опыт по применению сушилки аэродинамического нагрева камерного типа для сушки плодово-ягодного сырья.

Для расширения функциональных возможностей таких сушилок, увеличения их годовой загрузки предложена концепция модульной сушилки аэродинамического нагрева за счет использования дополнительного модуля в виде сушильной шахты для зерна.

Степень разработанности темы. Вопросами сушки растительного сырья занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Агеев П.С., Акулич П.В., Атаназевич В.И., Будников Д.А., Гинзбург А.С., Голубкович А.В., Горячкин В.П., Загоруйко М.Г., Лыков А.В., Малин Н.И., Масалимов И.Х., Павлушкин А.А., Рудобашта С.П., Кришер О., Саенко Ю.В., Смелик В.В., Тихомиров Д.А., и другие.

Большой вклад в развитие теории установок аэродинамического нагрева внесли Косточкин В.Н., Шадек Е.Г., Тевис П.И. и др.

Однако вопросы сушки зернового сырья в установках типа ПАП (печи аэродинамического подогрева) с рекуперацией теплоты отработанного сушильного агента практически не изучены. При этом включение дополнительного модуля в виде сушильной шахты для зерна в конструктивно-технологическую схему сушилки не должно влиять на режим работы ее основного модуля – сушильной камеры для плодово-ягодного сырья.

Цель исследования - разработка технологического процесса сушки зерна в модульной сушилке аэродинамического нагрева с обоснованием параметров её дополнительного модуля.

Задачи исследования.

1. На основе анализа конструкций зерносушилок обосновать конструктивно-технологическую схему дополнительного модуля сушилки аэродинамического нагрева.
2. Разработать математическую модель зависимости температуры сушильного агента от параметров модульной сушилки аэродинамического нагрева.

3. Исследовать влияние параметров модульной сушилки на температуру сушильного агента в режиме сушки зерна.

4. Произвести проверку в производственных условиях и технико-экономическую оценку предлагаемых решений.

Объект исследования. Технологический процесс модульной сушилки аэродинамического нагрева в режиме сушки зерна.

Предмет исследования. Влияние параметров модульной сушилки аэродинамического нагрева в режиме сушки зерна на параметры сушильного агента.

Научная новизна – обоснована необходимость двухконтурной циркуляции сушильного агента в модульной сушилке аэродинамического нагрева.

Теоретическая значимость заключается в получении зависимостей, позволяющих обосновать параметры дополнительного модуля сушилки аэродинамического нагрева для режима сушки семенного зерна.

Практическая значимость заключается в получении обоснованных параметров дополнительного модуля сушилки аэродинамического нагрева, обеспечивающих режим сушки зерна.

Методология и методы исследования. Исследования проведены с применением методов гидравлики, теплотехники, теории сушки, планирования эксперимента. Обработка результатов экспериментальных исследований методом корреляционно-регрессионного анализа проведена с использованием программ MS Excel, Statistica 13.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель зависимости температуры сушильного агента от параметров модульной сушилки при его двухконтурной циркуляции;
- влияние параметров модульной сушилки на температуру сушильного агента;
- результаты исследования в производственных условиях модульной сушилки в режиме сушки зерна.

Реализация результатов исследования. Модульная сушилка аэродинамического нагрева успешно прошла проверку в производственных условиях учхоза Брянского ГАУ. Материалы исследования, рабочие чертежи дополнительного модуля переданы в ООО «ОКБ по теплогенераторам» г. Брянск.

Степень достоверности результатов исследований. Различие результатов теоретических и экспериментальных исследований 1...4 %.

Апробация работы. Материалы доложены на национальных и международных научно – практических конференциях: «Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения» 2023, 2024, 2025 гг. (Брянский ГАУ), «Иновации и технологический прорыв в АПК»

2023, 2024, 2025 гг. (Брянский ГАУ), «Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе» 2023, 2024 гг. (Орловский ГАУ).

Личный вклад соискателя заключался в определении цели и задач диссертационной работы; выполнении теоретических и экспериментальных исследований модульной сушилки, анализе и интерпретации полученных данных; обосновании параметров модульной сушилки; определении технико-экономического эффекта; формулировке выводов; подготовке статей.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 11 печатных работах, из которых 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и два патента на полезные модели РФ № 216716 «Сушилка» и № 233989 «Сушилка». Лично автору принадлежат 1,70 п.л. из общего объема публикаций 6,71 п.л.

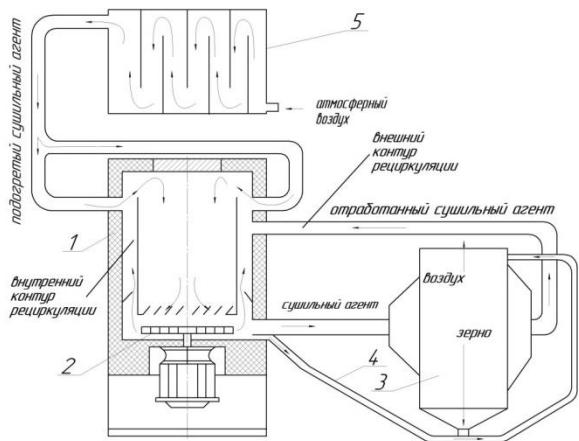
Структура и объем диссертационной работы. Объем диссертационной работы 156 страниц машинописного текста, включая введение, пять глав, заключение, список литературы из 117 наименований, в том числе 6 на иностранных языках. Содержит 102 рисунка, 3 таблицы и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, ее практическая значимость, приведены цель исследования, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Анализ по направлению исследования» дан анализ способов и технических средств нагрева сушильного агента, отмечены перспективы использования модульной сушилки аэродинамического нагрева для сушки зерна и возникающие при этом трудности, связанные с нахождением баланса между объемами сбрасываемого увлажненного сушильного агента и подсасываемого свежего воздуха, не ухудшающими температурно-влажностный режим сушки. Установлено, что по совокупности параметров наиболее подходящим типом дополнительного модуля для сушилки аэродинамического нагрева является сушильная шахта.

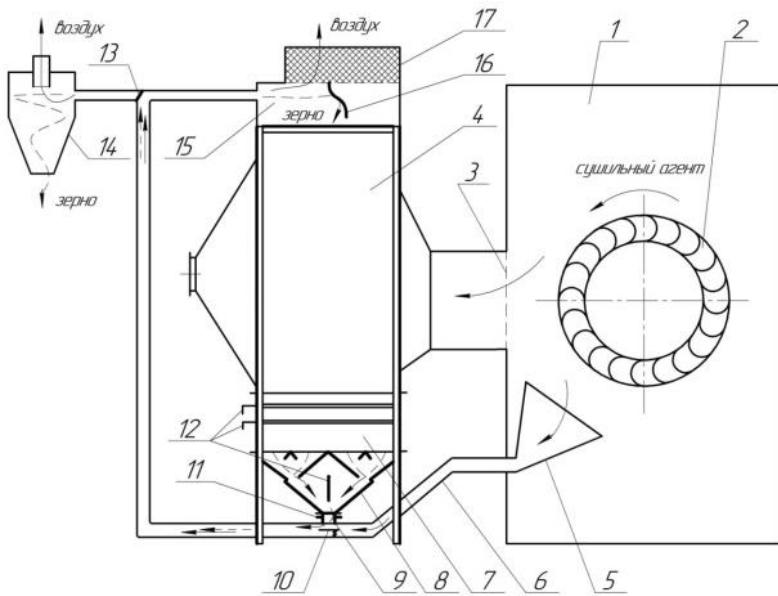
Во второй главе «Теоретическое обоснование параметров модульной сушилки аэродинамического нагрева» обоснована конструктивно-технологическая схема модульной сушилки (рис. 1.)



1 – базовый модуль (сушильная камера для сушки плодово-ягодного сырья); 2 – ротор-нагреватель; 3 – дополнительный модуль (сушильная шахта для зерна); 4 – пневмотранспортер; 5 – солнечный коллектор

Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема модульной сушилки аэродинамического нагрева

В предлагаемой схеме используется двухконтурная рециркуляции сушильного агента. Внешний контур – воздуховодами, соединяющими дополнительный модуль с базовым. Внутренний контур, замыкающий вход и выход ротора-нагревателя каналами базового модуля. Сброс части отработанного сушильного агента обеспечивается пневмотранспортером. Пневмотранспортирование зерна осуществляется за счет отбора части сушильного агента из рабочей камеры ротора-нагревателя. Конструктивно-технологическая схема дополнительного модуля представлена на рис. 2.



выпускного устройства; 9 – выпускное отверстие; 10 – приемное устройство пневмотранспортера; 11 – зерновые заслонки; 12 – клапана бесприводного выпускного устройства; 13 – переключатель потока; 14 – разгрузочный циклон; 15 – зерновой бункер; 16 – зерно-отбойный фартук; 17 – фильтрующее ограждение

Рисунок 2 – Конструктивно-технологическая схема выпускного устройства

Зерно из сушильной шахты 4 поступает в верхний бункер 7 выпускного устройства, затем в нижний бункер 8 и через зерновые заслонки 11 в приемное устройство пневмотранспортера 10.

Принимая для упрощения и удешевления конструкции шахты наиболее простую форму коробов по типу зерносушилки ДСП, получаем размер сушильной шахты равный 700x600x1500 мм. Для подачи сушильного агента в шахту предусмотрено 9 подводящих коробов, для отвода из шахты 8 отводящих полных коробов и 8 полукоробов. Общий объем, занимаемый зерном в сушильной шахте, составляет $0,6 \text{ м}^3$.

Структурно-функциональная схема модульной сушилки аэродинамического нагрева при организации двухконтурной рециркуляции сушильного агента представлена на рис. 3.

1 – рабочая камера ротора-нагревателя; 2 – ротор-нагреватель; 3 – смотровое окно рабочей камеры; 4 – сушильная шахта; 5 – воздухозаборник пневмотранспортера; 6 – материалопровод пневмотранспортера; 7 – верхний бункер бесприводного выпускного устройства; 8 – нижний бункер бесприводного выпускного устройства; 9 – выпускное отверстие; 10 – приемное устройство пневмотранспортера; 11 – зерновые заслонки; 12 – клапана бесприводного выпускного устройства; 13 – переключатель потока; 14 – разгрузочный циклон; 15 – зерновой бункер; 16 – зерно-отбойный фартук; 17 – фильтрующее ограждение

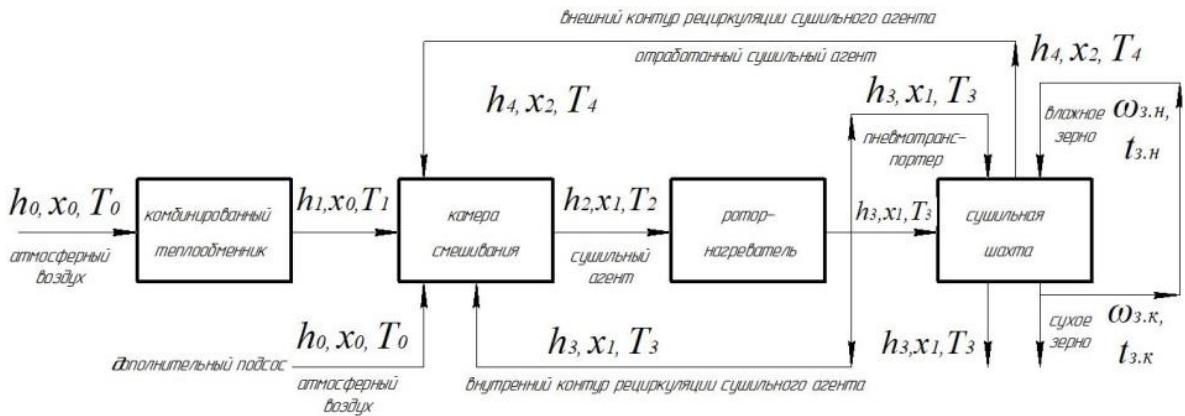


Рисунок 3 - Структурно-функциональная схема модульной сушилки аэродинамического нагрева

Для установления зависимости температуры сушильного агента при организации его двухконтурной рециркуляции рассмотрим уравнение теплового баланса сушилки за бесконечно малый промежуток времени dt :

$$dQ_{\text{кт}} + dQ_{\text{под}} + dQ_{\text{рн}} = dQ_{\text{зеп}} + dQ_{\text{п}} + dQ_{\text{ст}} + dQ_{\text{пт}}, \text{ кДж}, \quad (1)$$

где $dQ_{\text{кт}}$ - количество теплоты, воспринятой сушильным агентом (атмосферным воздухом) в комбинированном теплообменнике; $dQ_{\text{под}}$ - количество теплоты, поступившей с подсасываемым атмосферным воздухом через дополнительный патрубок; $dQ_{\text{рн}}$ - количество теплоты, полученной в рабочей камере ротора-нагревателя; $dQ_{\text{зеп}}$ - количество теплоты, идущей на нагрев зерна; $dQ_{\text{п}}$ - потери теплоты в окружающую среду через ограждения сушильной шахты; $dQ_{\text{ст}}$ - количество теплоты, идущей на нагрев стенок и коробов сушильной шахты; $dQ_{\text{пт}}$ - потери теплоты с воздушным потоком пневмотранспортера сушилки.

Раскрыв составляющие уравнения (1) получим дифференциальное уравнение, связывающее температуру сушильного агента в течение процесса сушки с конструктивными и режимными параметрами сушилки в виде:

$$k_1 t T^2(t) dt - k_2 t T(t) dt + k_3 T^2(t) dt - k_4 T(t) dt + k_5 t T(t) dT(t) - k_6 t dT(t) - k_7 T(t) dT(t) + k_8 t dt - k_9 dT(t) + k_{10} dt = 0, \quad (2)$$

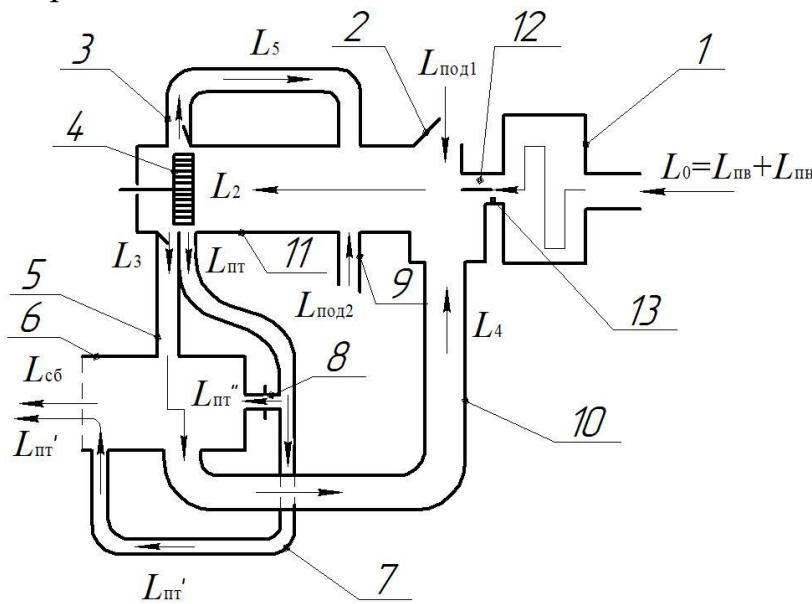
где $k_1 \dots k_{10}$ – коэффициенты, упрощающие математическую запись уравнения и определяемые соответствующим сочетанием конструктивных и режимных параметров сушилки; T – температура сушильного агента.

Уравнение (2) решается методом Эйлера первого порядка и аппроксимируется по методу наименьших квадратов экспоненциальной зависимостью:

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (3)$$

где T_0 – начальная температура сушильного агента; T_{\max} – максимальная температура сушильного агента; τ – постоянная времени.

Схема движения воздушных потоков в модульной сушилке представлена на рис. 4.



1 – комбинированный теплообменник; 2 – дверь в сушильную камеру; 3 – внутренний канал рециркуляции сушильного агента; 4 – ротор-нагреватель; 5 – подводящий патрубок сушильной шахты; 6 – сушильная шахта (дополнительный модуль); 7 – материалопровод пневмотранспортера; 8 – выпуск; 9 – патрубок

дополнительного подсоса атмосферного воздуха; 10 – внешний канал рециркуляции сушильного агента; 11 – сушильная камера (основной модуль); 12 – верхний подсасывающий патрубок; 13 – нижний подсасывающий патрубок

Рисунок 4 – Схема движения воздушных потоков в модульной сушилке

В камере смешивания на входе ротора-нагревателя образуется воздушный поток с расходом L_2 :

$$L_2 = L_4 + L_0 + L_{\text{под}1} + L_{\text{под}2} + L_5, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4)$$

где L_4 - расход рециркулирующего сушильного агента; L_0 - расход подсасываемого атмосферного воздуха через комбинированный теплообменник; $L_{\text{под}1}$ – расход подсасываемого атмосферного воздуха через приоткрытую дверь сушильной камеры; $L_{\text{под}2}$ – расход подсасываемого атмосферного воздуха через патрубок дополнительного подсоса; L_5 – расход воздуха через внутренний канал рециркуляции сушильной камеры.

Коэффициент рециркуляции отработанного сушильного агента

$$k_p = \frac{x_0 - x_1}{x_1 - x_2}, \quad (5)$$

где x_0 – начальное влагосодержание сушильного агента (атмосферного воздуха), кг/кг с.в.; x_1 – влагосодержание сушильного агента, кг/кг с.в.; x_2 – влагосодержание отработанного сушильного агента, кг/кг с.в.

В третьей главе «Подготовка экспериментальной части исследований» представлены программа и методика экспериментальных исследований, позволяющая получить необходимые данные для подтверждения теоретических положений диссертационной работы, вид и описание экспериментальных установок, методы обработки полученных данных.

Экспериментальные исследования проводились на модульной сушилке аэродинамического нагрева, представленной на рис. 5.



Рисунок 5 – Общий вид модульной сушилки аэродинамического нагрева с загрузочным транспортером

Определялись физико-механические свойства зерна пшеницы сорта «Московская-39», проводились исследования сушилки аэродинамического нагрева с дополнительным модулем при организации двухконтурной циркуляции сушильного агента. Для определения продолжительности процесса сушки использовано планирование эксперимента типа 3^2 с уровнями факторов: влажность зерна $\omega_3 = 16; 18; 20\%$; температура сушильного агента $T_3 = 50; 55; 60^\circ\text{C}$.

Четвертая глава «Результаты экспериментальных исследований». Модульная сушилка исследовалась в следующих режимах сушки зерна: без рециркуляции сушильного агента, при его одноконтурной и двухконтурной рециркуляции.

В каждом рециркуляционном тракте сушильной камеры базового модуля были установлены верхняя и нижняя поворотные заслонки с возможностью их фиксации в открытом, закрытом и среднем положениях.

Режим двухконтурной циркуляции сушильного агента с открытыми верхними поворотными заслонками был исследован при сушке зерна влажностью 16, 18, 20% (рис. 6, 7, 8).

Анализ рис. 6 - 8 показывает, что с увеличением исходной влажности зерна максимальная температура нагрева сушильного агента снижается. Так, при влажности зерна 16% температура сушильного агента в 60°C достигается на 40-й минуте процесса сушки (см. рис. 6).

При влажности зерна 18% температура сушильного агента в 60°C достигается на 80-й минуте процесса сушки (см. рис. 7). При влажности зерна 20% максимальная температура сушильного агента 52°C достигается на 70-й минуте процесса сушки (см. рис. 8).

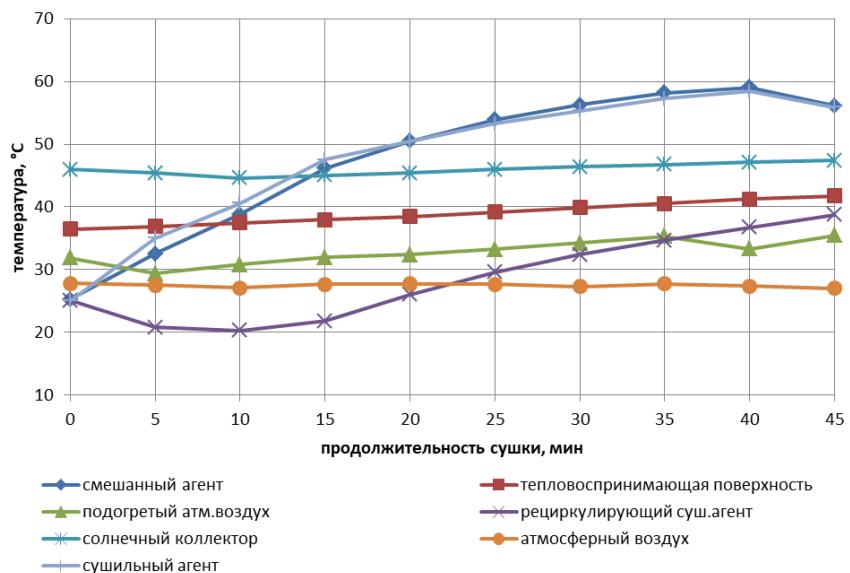


Рисунок 6 – Изменение температуры сушильного агента при сушке зерна влажностью 16%

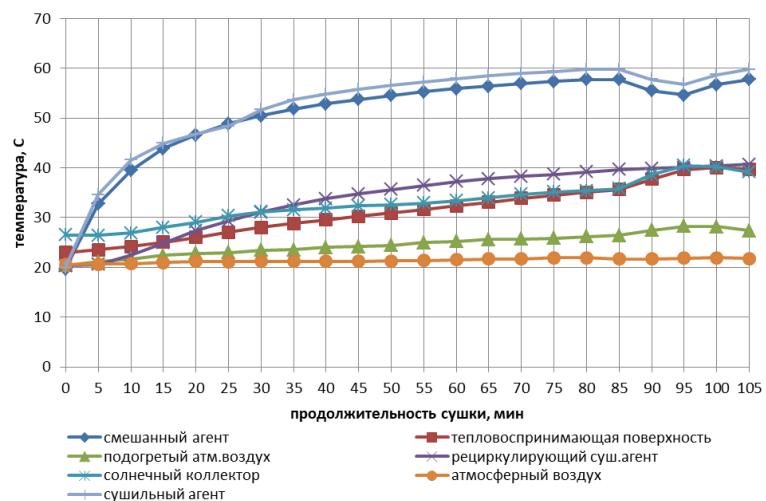


Рисунок 7 – Изменение температуры сушильного агента при сушке зерна влажностью 18%

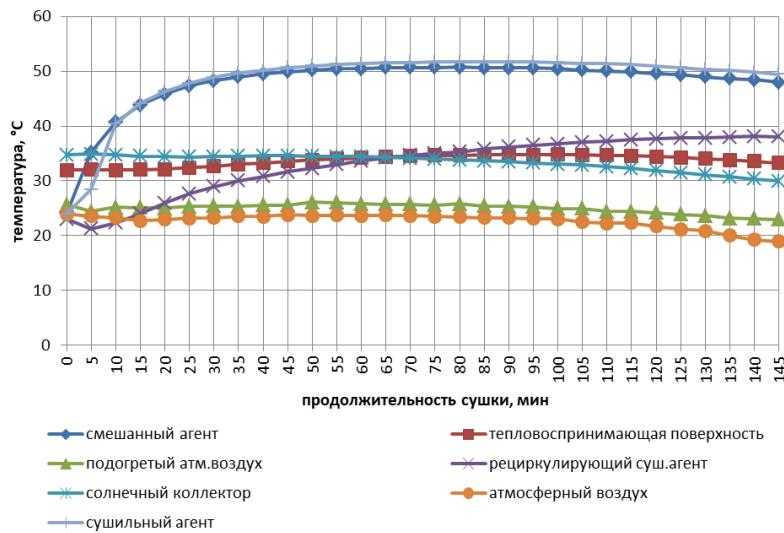


Рисунок 8 – Изменение температуры сушильного агента при сушке зерна влажностью 20%

При этом разница температур сушильного агента на входе и выходе из сушильной камеры в рассматриваемых опытах составляет в среднем 20°C.

В результате реализации матрицы планирования эксперимента получено уравнение регрессии в натуральных величинах:

$$t = -79,33 + 20,58\omega_3 - 3,5T_3. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции $R = 0,945$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,893$. Расчетное значение критерия Фишера $F_p = 25,145 > F_t = 5,14$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и уровне значимости F – критерия $p = 0,001$, что свидетельствует об адекватности уравнения регрессии.

Поверхность отклика и ее двумерное сечение представлены на рис. 9.

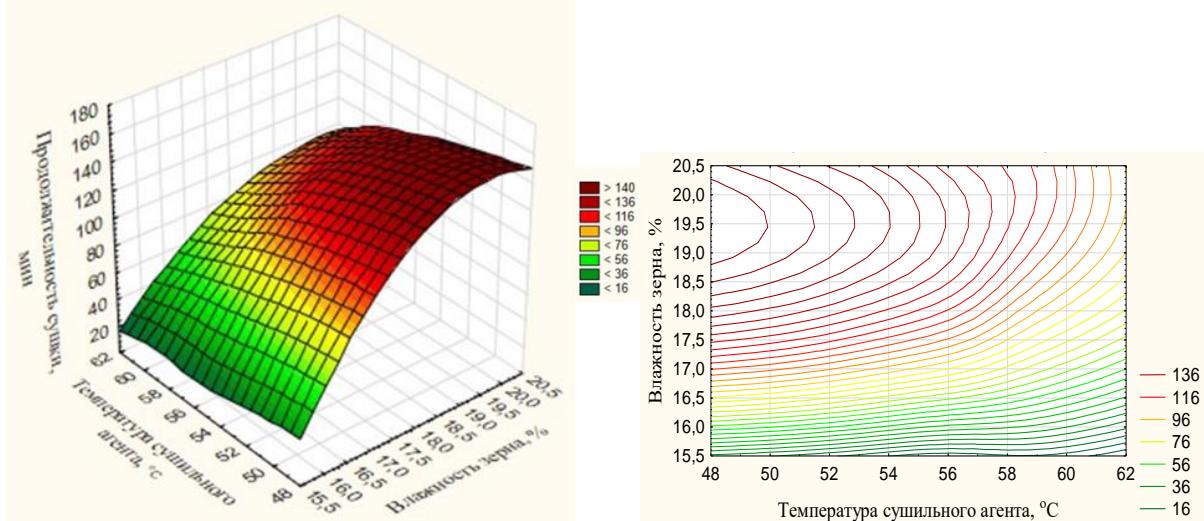


Рисунок 9 – Зависимость продолжительности сушки зерна от температуры сушильного агента и влажности зерна

Преобладающее влияние на продолжительность сушки оказывает влажность зерна. С ростом температуры сушильного агента и понижением влажности зерна продолжительность сушки снижается. При этом в продолжительность сушки входит время прогрева самой сушилки, которое составляет порядка 20 мин до набора температуры сушильного агента в пределах 45°C.

Исследование модульной сушилки в производственных условиях были проведены на базе учхоза Брянского ГАУ. Для исследования использовалось зерно пшеницы «Московская – 39».

В режиме двухконтурной рециркуляции сушильного агента были проведены исследования сушилки с полной загрузкой сушильной шахты. Сушке подвергалось зерно пшеницы средней влажностью 18 % в количестве 450 кг. Вначале в течение 10 минут производился разогрев сушильного агента при его рециркуляции только по внутреннему контуру до температуры 40 °C. При этом сушильный агент в сушильную шахту не поступал. Затем подключался внешний контур рециркуляции с подачей сушильного агента в сушильную шахту.

Изменение температуры сушильного агента при двухконтурной его рециркуляции в процессе сушки зерна представлено на рис. 10. Максимальная температура сушильного агента составила 52,3°C.

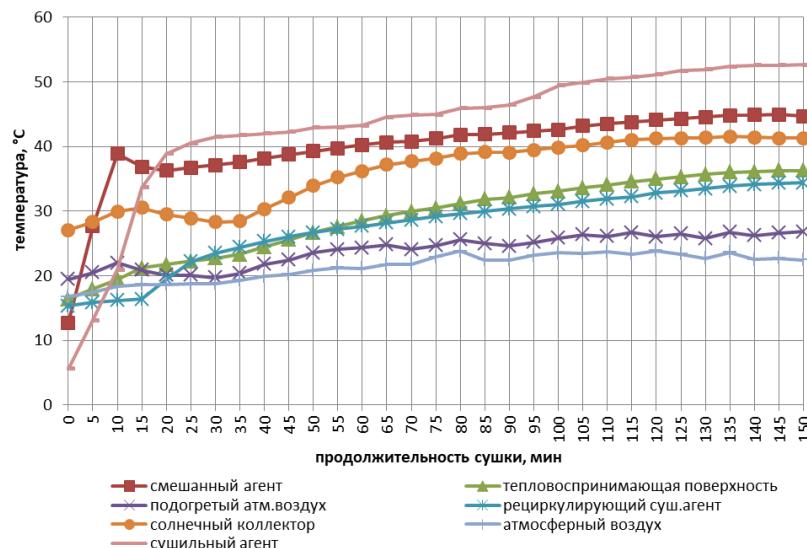


Рисунок 10 – Изменение температуры сушильного агента в процессе сушки зерна при двухконтурной рециркуляции

На рис. 11 представлены экспериментальная кривая изменения температуры сушильного агента (см. рис. 10), теоретическая кривая, построенная на основе решения дифференциального уравнения (2) и ее аппроксимация экспоненциальной зависимостью (3) по методу наименьших квадратов.

Анализ рис. 11 показывает, что на момент окончания процесса сушки значение температуры сушильного агента на основании теоретической и экспериментальной кривой практически совпадают.

Низкая в эксперименте начальная температура сушильного агента 5,6°C, связана с тем, находящийся в сушильной камере основного модуля воздух, а также внутренняя обшивка камеры за счет ее хорошей теплоизоляции не успели прогреться до температуры окружающей среды 17°C к началу испытаний.

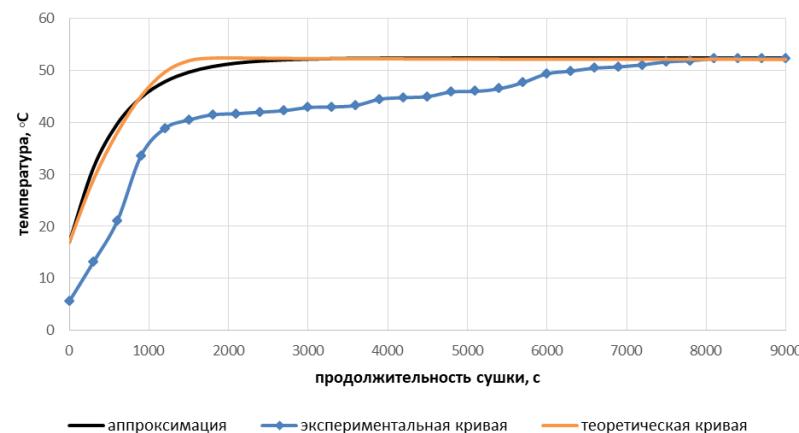


Рисунок 11 – Теоретическая и экспериментальная зависимости изменения температуры сушильного агента в процессе сушки зерна

Поэтому фактический рост температуры сушильного агента имеет отставание от теоретической зависимости. Тем не менее, при фактической температуре сушильного агента 52,34 °С в конце процесса сушки и расчетной температуре 52,16°С предложенные теоретические зависимости позволили определить температуру сушильного агента в конце процесса сушки с точностью до 5%. Это позволяет прогнозировать максимальную температуру нагрева зерна на основании регрессионной зависимости, полученной в результате обработки экспериментальных данных по сушке зерна в модульной сушилке (рис. 12).

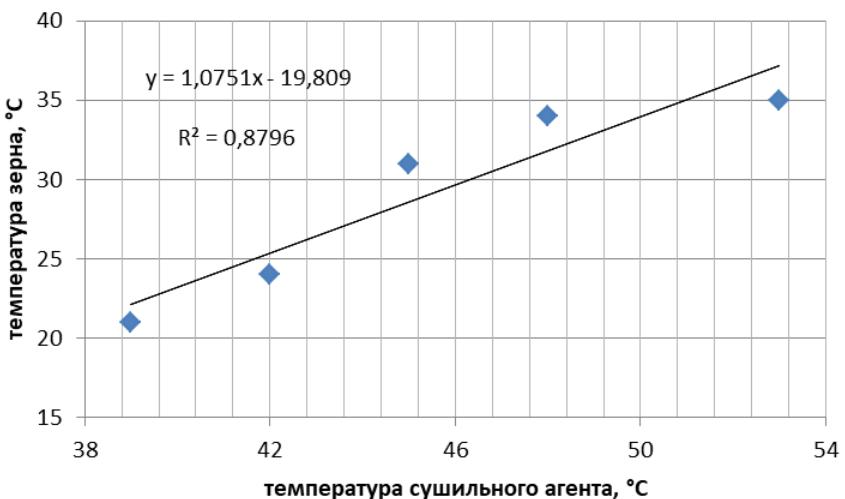


Рисунок 12 – Зависимость температуры зерна от температуры сушильного агента

При фактической температуре сушильного агента в конце процесса сушки 52,34 °С температура зерна достигла 35 °С, что с 4% ошибкой достаточно точно рассчитывается на основании регрессионной зависимости рис. 12.

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет с высокой точностью прогнозировать максимальную температуру нагрева сушильного агента. Более точное прогнозирование температуры сушильного агента на протяжении всего процесса сушки можно ожидать в случае использования модели для специализированной зерносушилки аэродинамического нагрева. Однако и в рассматриваемом случае достаточно точное определение максимальной температуры нагрева сушильного агента позволяет определить максимальную температуру нагрева зерна, которая определяет его дальнейшие технологические качества.

Кривая сушки и температурная кривая исследуемого процесса сушки зерна представлены на рис. 13.

Форма кривых характерна для капиллярнопористых коллоидных тел, к которым относится зерно. Процесс сушки продолжался 2,5 часа до достижения влажности зерна 14,5 %. При этом температура зерна достигла 35 °С. На рис. 14 представлена кривая скорости сушки.

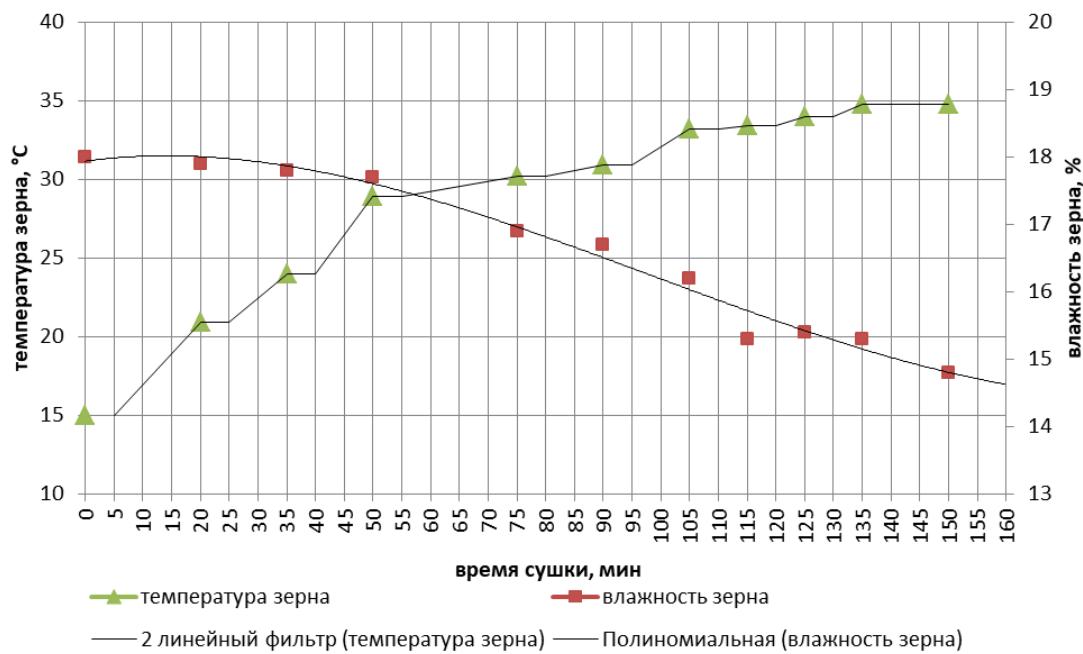


Рисунок 13 – Кривая сушки и температурная кривая

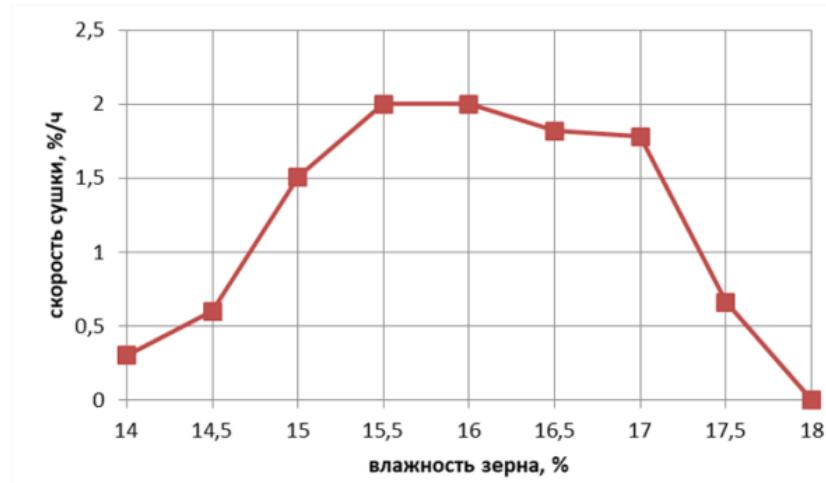


Рисунок 14 – Кривая скорости сушки

Максимальная скорость сушки составила 2 %/ч. После выгрузки зерна его влажность составила 13,5...13,8 %, что соответствует требованиям. Ранее проведенные испытания сушилки показали, что при выгрузке зерна из сушильной камеры пневмотранспортером дополнительное снижение влажности зерна может достигать до 1,0%.

Пятая глава «Технико-экономическая оценка модульной сушилки аэродинамического нагрева». Оценка модульной сушилки аэродинамического нагрева по критерию прямых эксплуатационных затрат на процесс показала, что в сравнении с использованием сушилки ATM-10 они снижаются на 537 руб./т или 24 % при использовании модульной сушилки. Срок окупаемости капитальных вложений определяется временем сушки 727 т зерна в модульной сушилке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сушилка аэродинамического нагрева обеспечивает сушку зерна за счет дополнительного модуля в виде сушильной шахты при организации двухконтурной рециркуляции сушильного агента: внешний – воздуховодами, соединяющими дополнительный модуль с базовым; внутренний - замыкает вход и выход ротора-нагревателя каналами базового модуля. Сброс части отработанного сушильного агента обеспечивается за счет работы выпускного устройства сушильной шахты, представляющего собой комбинацию бесприводного выпускного устройства механического типа и пневмотранспортера с разгрузочным циклоном и зерно-отбойным фартуком с фильтрующим ограждением в загрузочном бункере сушильной шахты.

2. Разработана математическая модель зависимости температуры сушильного агента от параметров модульной сушилки, которая позволяет прогнозировать максимальную температуру нагрева сушильного агента с погрешностью до 5 %.

Определены основные параметры сушильной шахты: объем сушильной шахты без учета объема бесприводного выпускного устройства составляет 0,63 м³ при габаритных размерах шахты 0,7x0,6x1,5 м; в шахте предусмотрено 9 подводящих коробов, 8 отводящих полных коробов и 8 полукоробов.

3. При организации двухконтурной рециркуляции отработанного сушильного агента температура его нагрева достигает 60 °С. При этом, температура нагрева зерна составляет 35 °С, максимальная скорость сушки равна 2%/ч, производительность сушилки 0,2 т/ч при начальной влажности зерна 20%. Требуемый расход воздуха при производительности пневмотранспортера 450 кг/ч и массовой концентрации транспортируемой смеси 0,9 кг/кг составляет 388 м³/ч. Мощность, затрачиваемая на работу пневмотранспортера, составляет 0,76 кВт.

Получены регрессионные зависимости продолжительности сушки зерна от его влажности и температуры сушильного агента, температуры нагрева зерна от максимальной температуры сушильного агента, что позволяет с погрешностью до 4% прогнозировать максимальную температуру нагрева зерна.

4. Исследование модульной сушилки в производственных условиях и ее технико-экономическая оценка по критерию прямых эксплуатационных затрат на процесс показали, что они снижаются на 537 руб./т или 24 % в сравнении с использованием сушилки АТМ-10. При снижении влажности зерна с 20 до 14 % энергоемкость процесса сушки составила 352 МДж/т, что также на 49,3% меньше. Срок окупаемости капитальных вложений определяется временем сушки 727 т зерна в модульной сушилке.

Рекомендации производству.

Для повышения производительности модульной сушилки необходимо увеличить мощность приводного электродвигателя и диаметр ротора-

нагревателя, использовать отдельный вентилятор для работы пневмотранспортера с двухрежимным забором воздуха – из камеры ротора-нагревателя и из атмосферы.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке сушилок аэродинамического нагрева для различного сельскохозяйственного сырья.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Исследование процесса сушки семян различных сельскохозяйственных культур в сушилке аэродинамического нагрева.

Положения диссертации и полученные результаты отражены в следующих основных публикациях

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России:

1. Влияние коэффициента рециркуляции сушильного агента на его температуру в сушилке аэродинамического нагрева / В.Н. Ожерельев, А.И. Купреенко, Д.А. Безик, Х.М.О. Исаев, **О.А. Купреенко** // Тракторы и сельхозмашины. - 2025. - Т. 92, № 1. - С. 99-106.

2. Влияние конструктивных параметров приемного устройства пневмотранспортера сушилки аэродинамического нагрева на его производительность / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, А.Г. Ялоза, **О.А. Купреенко**, С.Х. Исаев // АгроИнженерия. - 2025. - Том. 27, № 4. - С. 25-33.

3. Температура сушильного агента при его рециркуляции в модульной сушилке аэродинамического нагрева / А.И. Купреенко, Д.А. Безик, Х.М. Исаев, Т.В. Панова, **О.А. Купреенко**, А.Г. Ялоза // Вестник Брянской ГСХА. - 2025. - № 3 (109). - С. 46-53.

4. Обоснование конструктивных параметров бесприводного выпускного устройства модульной сушилки аэродинамического нагрева / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, А.Г. Ялоза, **О.А. Купреенко**, С.Х. Исаев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. - 2025. - Т. 17, № 2. - С.101-109.

Патенты на изобретения и полезные модели:

5. Патент на полезную модель 216716 РФ, МПК F26B 9/06 Сушилка / А.И. Купреенко, В.Н. Ожерельев, Х.М. Исаев, С.М. Михайличенко, **О.А. Купреенко**, А.Г. Ялоза - № 2022119604; заявлено 18.07.22; опубликовано 22.02.23, Бюл. № 6.

6. Патент на полезную модель № 235987 РФ, МПК F26B 9/06 Сушилка / А.И. Купреенко, Х.М.О. Исаев, Т.В. Панова, М.В. Панов, В.Н. Ожерельев, **О.А. Купреенко** - № 2024112127; заявлено 02.05.24; опубликовано 21.07.25, Бюл. № 21.

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать лазерная

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Заказ №1682 подписано в печать 22.01.2026 г.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический
университет*

имени П.А. Костычева»

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1

*Отпечатано в издательстве учебной литературы и учебно-
методических пособий ФГБОУ ВО РГАТУ*

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1