

На правах рукописи



Коваленко Родион Михайлович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ
СИСТЕМЫ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО
УСТРОЙСТВА ДЛЯ СУШКИ ЗЕРНА**

Специальность 4.3.1. «Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Княгинино – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Костромская государственная сельскохозяйственная академия» на кафедре «Технические системы в агропромышленном комплексе»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Волхонов Михаил Станиславович

Официальные оппоненты:

Смелик Виктор Александрович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Технические системы в агробизнесе»

Кузнецов Николай Николаевич

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина», декан инженерного факультета

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет»

Защита состоится 31 октября 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 72.2.016.02 при ГБОУ ВО НГИЭУ по адресу: 606340, Россия, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22 а, корпус 1, аудитория 121.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГБОУ ВО НГИЭУ и на сайте <https://ngieu.ru/state-scientific-attestation/dissovet-72201602/>

Автореферат разослан _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тареева Оксана Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Зерно является одним из основных сельскохозяйственных продуктов, увеличение его производства было и остается ключевой проблемой развития сельского хозяйства.

Во всей технологической цепочке послеуборочная обработка зерна занимает лидирующие позиции по ресурсоемкости процесса, в которой затраты топлива могут достигать 50 %, электроэнергии до 98 %. Сушка – основная и наиболее сложная технологическая операция послеуборочной обработки зерна. Для максимальной эффективности сушки зерна необходимо сократить энергозатраты, что является приоритетным направлением в данной отрасли.

Наиболее перспективным способом снижения энергозатрат на сушку зерна является повторное использование теплоты отработавшего агента сушки, который способствует стабилизации параметров сушки, воздух, проходящий через зерно, нагревается и увлажняется, затем частично возвращается в систему, что помогает поддерживать равномерное распределение теплоты агента сушки и уровня его влагосодержания.

В последнее время в нечерноземной зоне России наиболее широкое распространение получили зерновые сушилки бункерного типа, ввиду своей простоты, мобильности, невысокой стоимости и небольшого расхода топлива. Однако бункерные сушилки обладают рядом недостатков: травмируют высоковлажное зерно шнеками; отмечается чрезмерная запыленность рабочей зоны при рециркуляции зерна. Использование сушилок аэродинамического типа позволяет минимизировать травмирование зерна. В известных конструкциях аэродинамических сушилок агент сушки после прохождения через зерно выбрасывается в атмосферу, не отработав полностью свой тепловой потенциал, им также присуща проблема запыленности рабочей зоны.

Степень разработанности темы. Научными исследованиями в области снижения энергоемкости процесса сушки зерна занимались: В.И. Атаназевич, А.И. Бурков, В.Н. Вершинин, М.С. Волхонов, А.В. Голубкович, Ю.В. Есаков, И.Б. Зимин, Н.Л. Кобышев, Н.Н. Кузнецов, К.И. Куценко, Н.И. Малин, И.Э. Мильман, Г.С. Окунь, А.Н. Перекопский, С.Д. Птицын, О.П. Рошин, В.А. Смелик, А.Г. Чижиков, А.Г. Чижов и другие.

Несмотря на большое количество научно-исследовательских работ, в которых рассматриваются вопросы снижения энергоемкости процесса сушки зерна путем рециркуляции теплоты отработавшего агента сушки, полученные в них данные не отражают пределы возможного использования теплоты отработавшего агента сушки с различным влагосодержанием и недостаточно изучено подмешивание к нему свежего воздуха.

Целью исследования является повышение энергоэффективности процесса сушки зерна на аэродинамическом устройстве.

Задачи исследования:

– разработать критерий (показатель) оценки совершенства конструкции зерновых сушилок;

– на диаграмме тепловлажностного состояния воздуха смоделировать режимы работы тепловентиляционной системы при повторном использовании теплоты отработавшего агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха и без

подмешивания, определить режимы и параметры контроля работы тепловентиляционной системы с наименьшим интегральным расходом энергии на конвективную сушку зерна, исключая конденсацию влаги в сушильной камере;

– на основе анализа существующих конструкций зерновых сушилок разработать конструкцию нового аэродинамического устройства для сушки зерна оснащённого системой рециркуляции агента сушки, работающей в ручном и автоматическом режимах;

– провести лабораторные исследования и производственные испытания работы аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащенного системой рециркуляции агента сушки, определить оптимальный режим его работы;

– оценить технико-экономический эффект разработанного аэродинамического устройства для сушки зерна с системой рециркуляции сушильного агента.

Объект исследования – технологический процесс работы тепловентиляционной системы аэродинамического устройства для сушки зерна.

Предмет исследования – изменение параметров агента сушки в различных режимах работы системы рециркуляции с подмешиванием свежего воздуха.

Научную новизну работы составляют:

– разработанный критерий (показатель) оценки совершенства конструкции зерновых сушилок;

– разработанная конструктивно-технологическая схема аэродинамического устройств для сушки сыпучих материалов (патент РФ на изобретение № 2777996);

– графоаналитическое обоснование эффективных режимов работы системы рециркуляции агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха;

– конструктивно-технологическая схема и обоснование режимов работы четырехходового клапана системы рециркуляции агента сушки, автоматикой, принцип работы которой, базируется на основе результатов проведенного теоретического исследования.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработан критерий (показатель) оценки совершенства конструкции зерновой сушилки. Разработаны модели, на основе которых осуществляется управление и удержание тепловентиляционной системы в рациональном режиме работы. Ценность работы с практической точки зрения заключается в разработанной конструкции аэродинамического устройства для сушки зерна на основе тканых материалов. Использование тканых материалов обеспечивает снижение металлоемкости и удешевление конструкции, уменьшение трудоёмкости и времени изготовления сушилки. Применение системы рециркуляции агента сушки с автоматическим управлением подмешиванием свежего воздуха снижает энергозатраты на сушку до 35 %. Сушилка прошла производственные испытания в условиях «Опытного поля» ФГБОУ ВО Костромской ГСХА и ЗАО «Шунга» Шунгенского сельского поселения Костромского района Костромской области.

Теоретическая и методологическая основа исследования. В исследовании использованы методы математической статистики и теории эксперимента. Использование данных методов основывалось на применении современных технических средств и измерительных приборов. Обработка опытных данных велась в приложениях MS Office Word, Excel, КОМПАС-3D, Paint.NET, STATGRAPHICS Plus для MS Windows.

Исследование проведено на основе системного подхода к комплексу теоретических и экспериментальных результатов, полученных при помощи классических математических, физических, статистических методов, а также экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях. Нормативной базой исследования явились нормативно-законодательные документы, данные, опубликованные в научных работах ученых, аналитические материалы научно-исследовательских организаций России и стран мира.

Достоверность основных выводов подтверждена результатами экспериментальных исследований, выполненных с использованием современных методик, положительными результатами производственных испытаний устройства.

Основные положения, выносимые на защиту:

- методика расчёта критерия (показателя) оценки совершенства конструкции зерновых сушилок.

- модели работы тепловентиляционной системы при повторном использовании теплоты отработавшего агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха и без подмешивания, позволяющие определить режимы и параметры контроля работы тепловентиляционной системы.

- конструкция нового аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащённая системой рециркуляции агента сушки, работающая в ручном и автоматическом режимах.

- результаты лабораторных исследований и производственные испытаний работы аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащенного системой рециркуляции агента сушки;

- технико-экономическая эффективность сушки зерна на разработанном аэродинамическом устройстве с системой рециркуляции сушильного агента.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научных и научно-практических конференциях: региональном этапе Всероссийской программы поддержки талантливой молодежи «Умник 2021» и «Умник 2023», г. Кострома; 72 Международной научно-практической конференции «Научные приоритеты агропромышленного комплекса в России и за рубежом» 2021 год, г. Кострома; 73 Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе 2022 год, г. Кострома; Всероссийской научно-практической конференции «Современное состояние проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса» 2022 год, г. Иваново; 74 Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современная наука: актуальные вопросы и достижения в эпоху трансформационных процессов 2023 год, г. Кострома.

Публикации. Опубликовано 4 работы в изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание степени кандидата наук. Получен патент № 2777996 – запись о регистрации патента внесена в Государственный реестр изобретений Российской Федерации от 12.08.2022.

Личный вклад автора в работу. По теме диссертации автором лично и при его непосредственном участии выполнены все этапы работы, включающие проведение критического обзора существующих зерновых сушилок и технологий применяемых в

них, формулировку цели и задач исследований, теоретическое обоснование теплотехнической эффективности рециркуляции агента сушки, разработку аэродинамического устройства для сушки зерна, определение оптимальных параметров и режимов работы системы рециркуляции отработавшего агента сушки, проведение производственных испытаний разработанного устройства и определение его экономической эффективности.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка литературы со 137 наименованиями, изложена на 135 листах машинописного текста, содержит 74 рисунка, 12 таблиц, 10 приложений.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дана общая характеристика работы, изложены основные научные положения и результаты исследования, выносимые на защиту.

Первый раздел «Состояние вопроса и задачи исследования» посвящен анализу способов сушки зерна, на основании которого установлено, что наиболее доступным и широко применяемым является конвективный способ сушки. Проанализированы основные виды зерновых сушилок, широкое распространение получили зерновые сушилки бункерного типа, главными недостатками которых является травмирование высоковлажного зерна шнеками и чрезмерная запыленность рабочей зоны. За счет применения аэродинамических устройств, можно минимизировать травмирование зерна. Сегодня в конструкциях сушилок находит отражение относительно новый технологический принцип – принцип повторного использования отработавшего агента сушки. Несмотря на значительное количество научно-исследовательских работ, в которых рассматриваются вопросы снижения энергоемкости процесса сушки зерна путем рециркуляции теплоты отработавшего агента сушки, полученные в них данные не отражают пределы возможного использования теплоты отработавшего агента сушки с различным влагосодержанием и недостаточно изучено влияние подмешивания к нему свежего воздуха.

Во втором разделе «Обоснование конструктивно–технологической схемы повторного использования агента сушки» обоснован обобщенный критерий (показатель) оценки совершенства конструкции зерновых сушилок – «комплексный показатель совершенства конструкции сушиллки» K_p , $(\text{МДж} \cdot \text{т} \cdot \text{ч}^2) / (\text{пл. т} \cdot \text{кг. исп. вл.})$:

$$K_p = M_{уд} \cdot Q, \quad (1)$$

где $M_{уд}$ – удельная металлоёмкость, $(\text{т} \cdot \text{ч}) / \text{пл. т}$;

Q – удельный расход теплоты, $(\text{МДж} \cdot \text{ч}) / \text{кг. исп. вл.}$.

Более эффективными являются сушилки с наименьшим значением K_p . Для наглядности и облегчения выбора сушилок предлагается использовать результаты ранжирования зерносушилок по комплексному показателю к их удельной стоимости (рисунок 1).

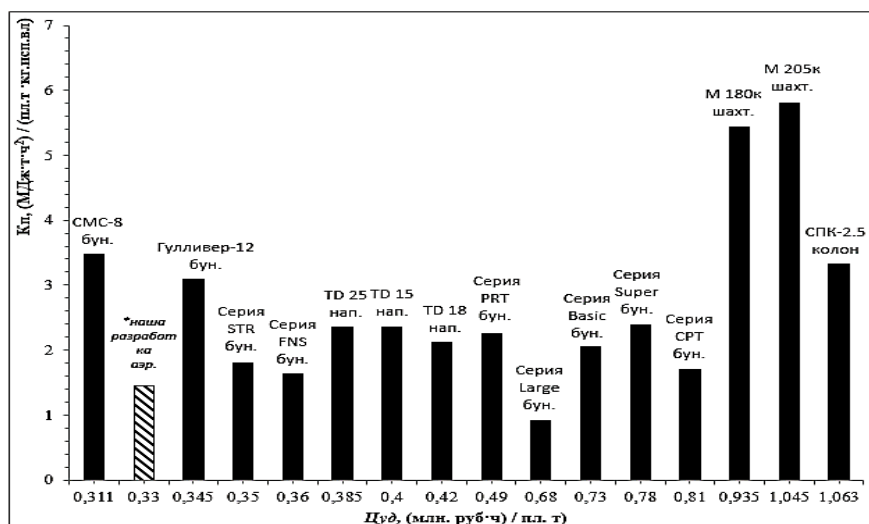


Рисунок 1 – Графическое представление показателей эффективности зерновых сушилок: *бун.* – бункерный тип сушилки; *нап.* – напольный тип сушилки; *колон.* – колонковый тип сушилки; *шахт.* – шахтный тип сушилки; * – аэродинамическое устройство для сушки зерна.

Проведено графическое моделирование подмешивания свежего воздуха при повторном использовании агента сушки на основе диаграммы тепловлажностного состояния воздуха, разработанной профессором Л.К. Рамзиным. Схемы режимов работы тепловентиляционной системы приведены на рисунке 2.

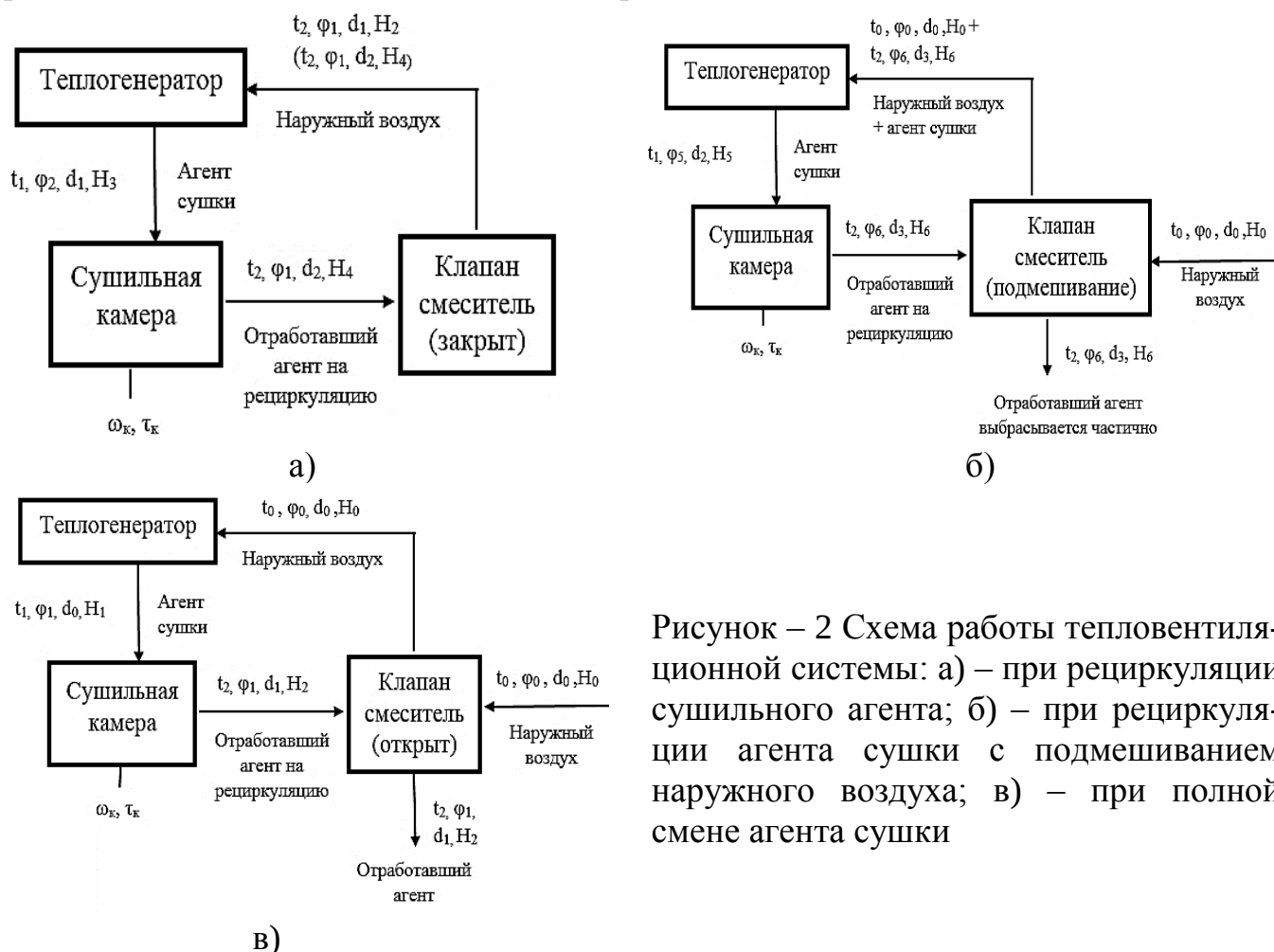


Рисунок – 2 Схема работы тепловентиляционной системы: а) – при рециркуляции сушильного агента; б) – при рециркуляции агента сушки с подмешиванием наружного воздуха; в) – при полной смене агента сушки

На H-d диаграмме были смоделированы по пять циклов повторного использования теплоты отработавшего агента сушки. 1 цикл – исходные значения без подмешивания свежего воздуха, остальные 4 – при рециркуляции агента сушки, нагретого до 70 °С с подмешиванием 10 % свежего воздуха (рисунок 3). Были сделаны следующие допущения: агент сушки увлажняется до 70 %; потери в окружающую

среду отсутствуют – теоретический процесс. По H - d диаграмме определили входные и выходные параметры в каждом i -ом цикле.

Первый цикл повторного использования теплоты отработавшего агента сушки – без подмешивания. Входные параметры: точка A_1 : $d_0 = 4$ г/кг с.в.; $H_0 = 15,91$ кДж/кг с.в.; далее следует нагрев наружного воздуха до $t_1 = 70$ °С, при $d = \text{const}$; точка B_1 : $d_1 = 4$ г/кг с.в.; $H_1 = 81,22$ кДж/кг с.в. Сушка – испарение в теоретическом процессе происходит при $H = \text{const}$ до $\varphi_2 = 70$ %. Выходные параметры, точка C_1 : $d_2 = 19,64$ г/кг с.в.; $H_2 = 81,22$ кДж/кг с.в.

Второй цикл повторного использования теплоты отработавшего агента – подмешивание свежего воздуха. Значения точки A_2 : начальные d_3 и H_3 смеси определяли по известным зависимостям:

$$d_3 = \frac{G_{c1} \cdot d_1 + G_{c2} \cdot d_2}{G_{c1} + G_{c2}}, \quad (2)$$

$$H_3 = \frac{G_{c1} \cdot H_1 + G_{c2} \cdot H_2}{G_{c1} + G_{c2}}, \quad (3)$$

где G_c – количество сухого воздуха, кг. (использовали процентное соотношение).

Входные параметры, точка A_2 : $d_0 = 18,08$ г/кг с.в.; $H_0 = 75,76$ кДж/кг с.в.; далее следует нагрев смеси отработавшего агента сушки с наружным воздухом до $t_1 = 70$ °С при $d = \text{const}$; точка B_2 : $d_1 = 18,08$ г/кг с.в.; $H_1 = 118,27$ кДж/кг с.в. Сушка – испарение при $H = \text{const}$ до $\varphi_2 = 70$ %. Выходные параметры, точка C_2 : $d_2 = 30,87$ г/кг с.в.; $H_0 = 118,27$ кДж/кг с.в.

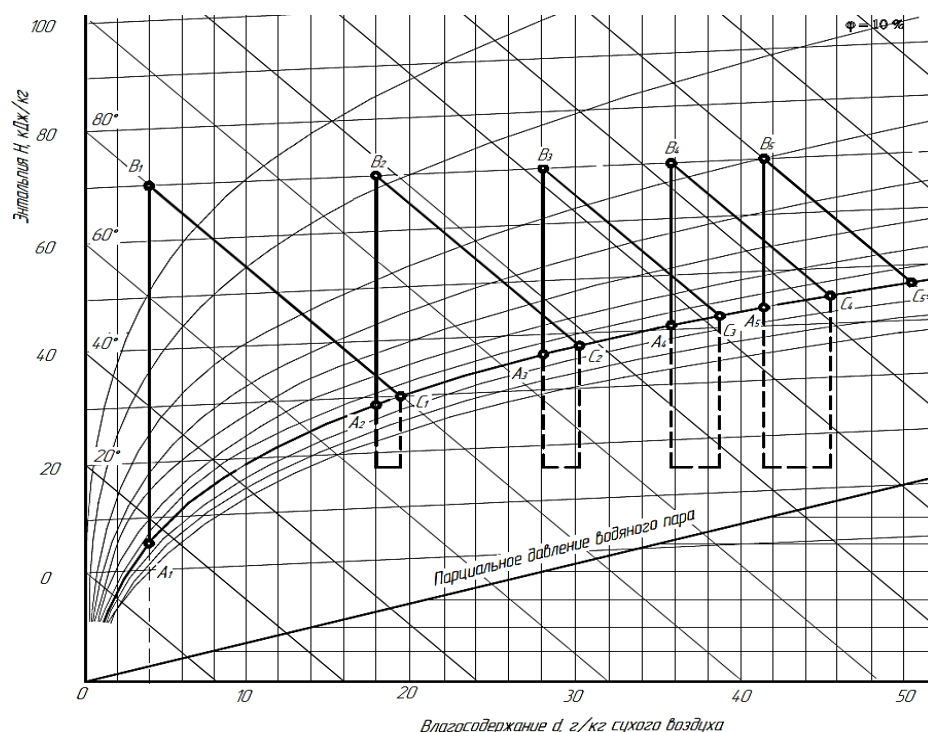


Рис. 3 – Модель работы тепловентиляционной системы в режиме рециркуляции агента сушки при подмешивании 10 %: точки A_2 – A_5 – начальные параметры цикла при постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

По аналогии рассчитали остальные три цикла для нагрева агента сушки до 70 °С и смоделировали по пять циклов нагрева агента сушки до 70 °С с подмешиванием 20...40 % свежего воздуха, а также нагрева агента сушки до температуры 40 °С и 100 °С с подмешиванием 10...40 % свежего воздуха.

Исходя из условий сушки плановой тонны зерна пшеницы при нормальных условиях, в соответствии с ГОСТом Р 55262-2012 определяли зависимости влияния циклов повторного использования теплоты отработавшего агента сушки, нагретого до 40, 70, 100 °С с подмешиванием 10...40 % свежего воздуха, на интегральный расход энергии на испарение влаги из зерна.

Расчётные рациональные контрольные значения температуры агента сушки на выходе из сушилки и экономия суммарных энергозатрат при подмешивании свежего воздуха к отработавшему агенту сушки, нагретому до 100 °С, приведены на рисунке 4. Контрольные параметры необходимы для удержания тепловентиляционной системы в рациональном режиме и при ее автоматизации.

Показатели на входе в сушилку при 4-5 цикле сушки	Показатели на выходе из сушилки при 4-5 цикле сушки и температуре агента 100 °С
$t_{a.c.} = 100\text{ °С}$	
без подмешивания $\varphi = 4,43 - 7,51\%$	без подмешивания $t_d = 57,91 - 61,27\text{ °С}$ $t_f = 50,51 - 53,7\text{ °С}$ $\varphi = 70\%$ $\Sigma k = 18,14 - 17,91\%$
10% подмешивания $\varphi = 4,06 - 6,39\%$	10% подмешивание $t_d = 55,36 - 57,87\text{ °С}$ $t_f = 48,08 - 50,47\text{ °С}$ $\varphi = 70\%$ $\Sigma k = 17,91 - 17,91\%$
20% подмешивания $\varphi = 3,69 - 5,71\%$	20% подмешивание $t_d = 52,84 - 54,61\text{ °С}$ $t_f = 45,69 - 47,38\text{ °С}$ $\varphi = 70\%$ $\Sigma k = 17,44\%$
30% подмешивания $\varphi = 3,32 - 4,88\%$	30% подмешивание $t_d = 50,39 - 51,55\text{ °С}$ $t_f = 43,36 - 44,47\text{ °С}$ $\varphi = 70\%$ $\Sigma k = 16,74 - 16,98\%$
40% подмешивания $\varphi = 2,95 - 4,1\%$	40% подмешивание $t_d = 48,05 - 48,74\text{ °С}$ $t_f = 41,14 - 41,8\text{ °С}$ $\varphi = 70\%$ $\Sigma k = 15,81\%$

Рисунок 4 – Рациональные контрольные значения параметров отработавшего агента сушки, нагретого до 100 °С с постоянным подмешиванием свежего воздуха

Рециркуляция агента сушки может осуществляться только при условии отсутствия конденсации влаги на поверхности материала, важным критерием эффективности является температура точки росы. В разработанной сушилке температура зерна плавно повышается при прогреве сушилки и при сушке за счёт испарения влаги с поверхности зерновки – в периоде постоянной скорости сушки не поднимается выше 42 – 45 °С. На рисунке 5 приведены расчетные зависимости температуры точки росы и температуры зерна в конце цикла сушки при 70 °С и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха.

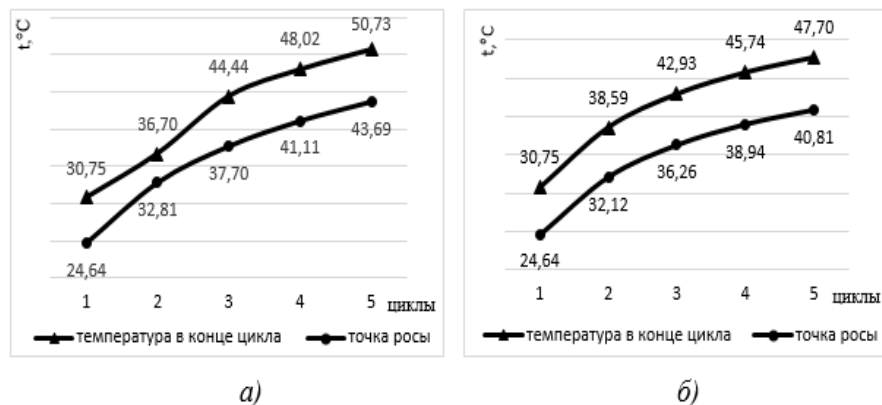


Рисунок 5 – Зависимость точки росы от температуры зерна в конце цикла сушки при 70°С: а) – при закрытом клапане; б) – при постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

Характеристика сети в различных режимах работы системы рециркуляции агента сушки (рисунок 6), построенная на основании полученных экспериментальных данных, указывает на то, что в режимах подмешивания расход воздуха через сеть

возрастает при использовании системы рециркуляции и ещё больше возрастает при подмешивании свежего воздуха, что приводит к увеличению скорости фильтрации агента сушки через зерно, и как следствие, увеличению скорости его сушки.

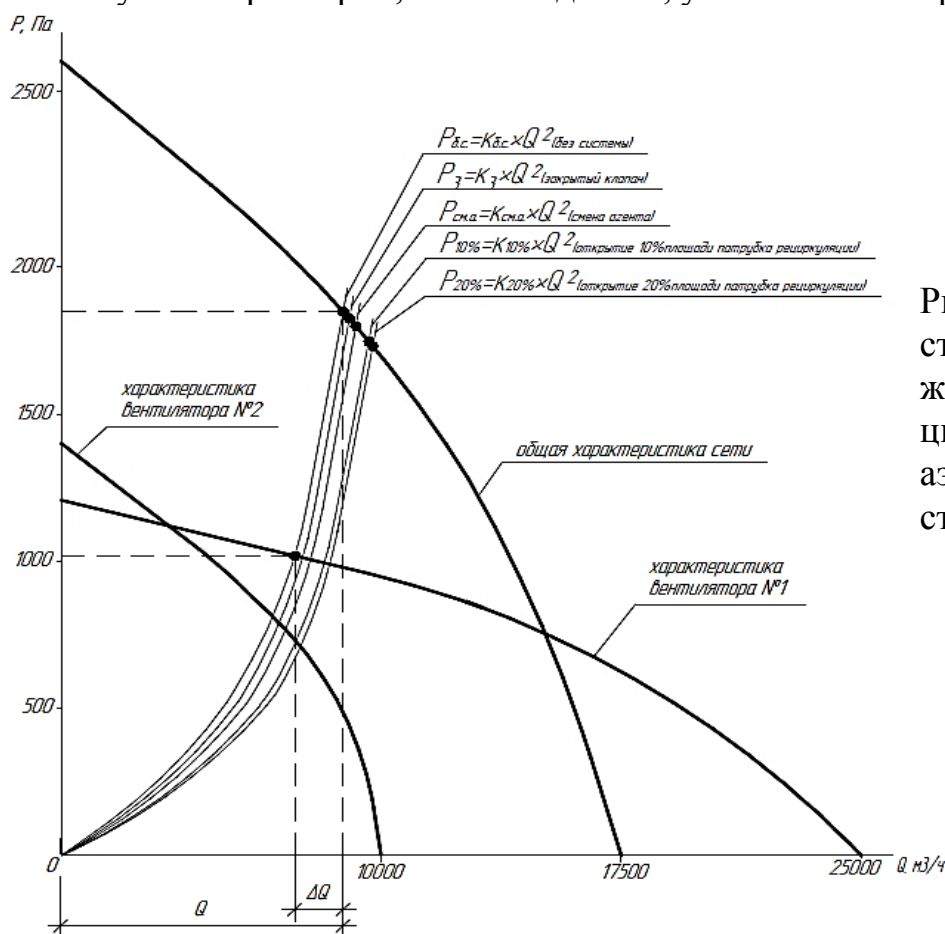


Рисунок 6 – Характеристика сети в различных режимах работы системы рециркуляции агента сушки аэродинамического устройства для сушки зерна

Нами разработано аэродинамическое устройство сушки зерна (Патент №2777996) представленное на рисунке 7, которое конструктивно собирается по каркасно-тканевой технологии. С целью повышения качества вентилирования, подсушки и сушки, снижения энергоемкости процесса, запыленности рабочей зоны, установлена система рециркуляции агента сушки. Аэродинамическое устройство для сушки зерна работает следующим образом: при отсутствии загрузочной норрии сдвижной зонт 6 сдвигается в сторону пылеулавливающего устройства 5, зерно загружается сверху в разработанное устройство, на грузонесущую перфорированную перегородку 18, затем зонт сдвигается в исходное положение и фиксируется герметично. При наличии загрузочной норрии через загрузочное отверстие 11 зерно загружается, затем отверстие закрывается герметично. Включается вентилятор 1, при этом агент сушки, проходящий через зерно, нагревает его, насыщается испарённой влагой, проходит через надсушильное пространство 21, созданное сдвижным зонтом 6 и пылеулавливающее устройство 5, вентилятором-аспиратором 8 направляется в клапан-смеситель 3. В зависимости от положения поворотной заслонки 15, «в режиме рециркуляции» (рисунок 8, а), отработавший агент сушки может быть полностью или частично направлен на повторное использование, либо полностью направлен в атмосферу через патрубок 12 «режим смены теплоносителя» (рисунок 8, в). В режиме «смешивание» (рисунок 8, б), смесь частично отработавшего агента сушки и наружного воздуха вентилятором 1 подается в теплогенератор 4 и далее в камеру сушки 7. Неподвижная заслонка 13, перекрывающая камеру

смешивания 14 между патрубками подвода наружного воздуха и отработавшего агента сушки и поворотная заслонка 15 обеспечивают точное и необходимое соотношение частично отработавшего агента сушки и наружного воздуха. Положение поворотной заслонки зависит от температуры и влагосодержания отработавшего агента сушки, подаваемого в камеру смешивания, и наружного воздуха и может устанавливаться вручную или с помощью автоматической системы управления. По окончании процесса охлаждения, вентилирования или подсушки зерна для осуществления его выгрузки открывается шиберная заслонка выпускного лотка, подача воздуха осуществляется только под грузонесущую перегородку 17.

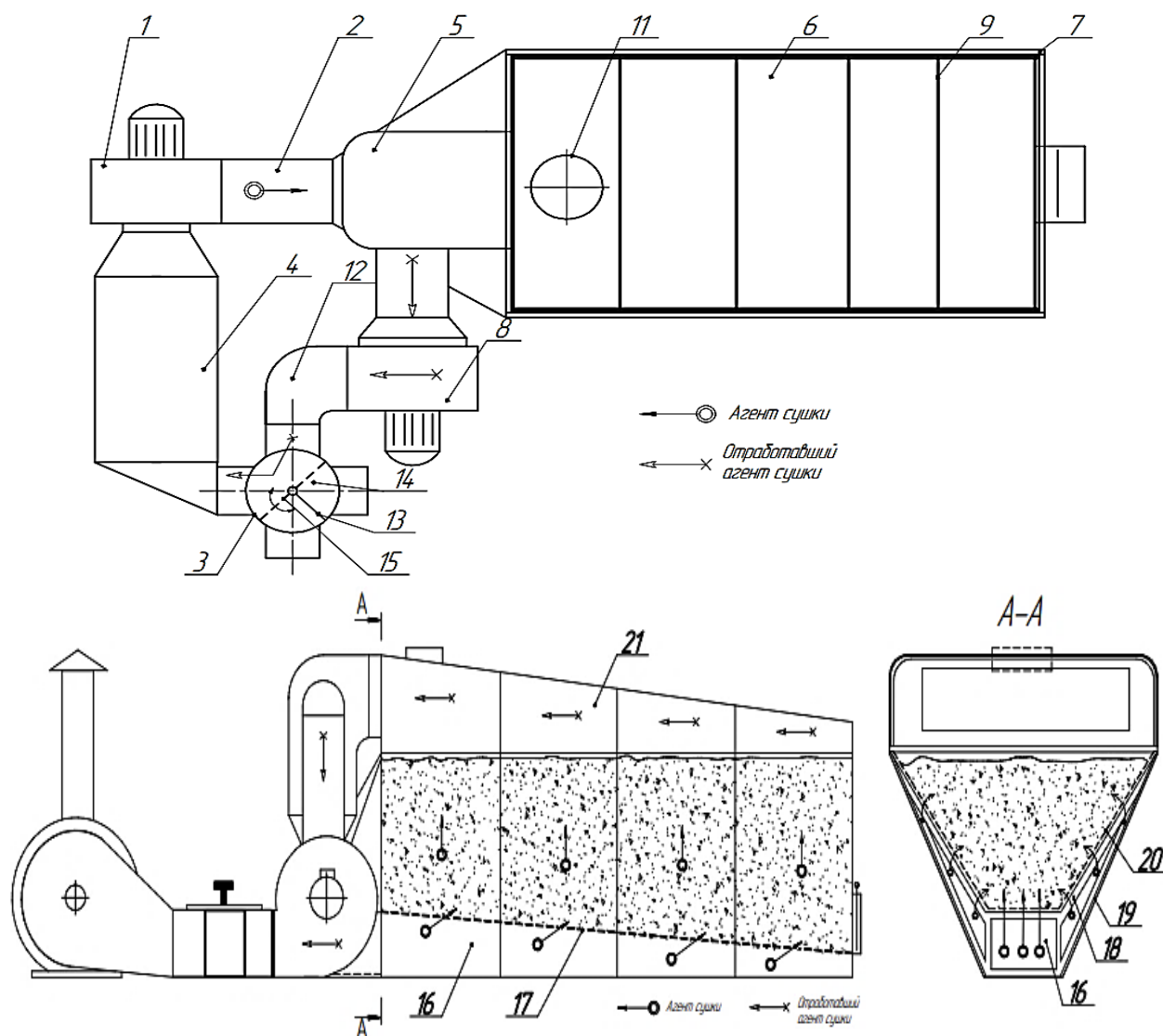


Рисунок 7 – Общий вид аэродинамического устройства для сушки зерна: 1 – подающий вентилятор; 2, 12 – воздуховод; 3 – клапан-смеситель; 4 – теплогенератор; 5 – пылеуловитель; 6 – сдвижной зонт; 7 – камера сушки; 8 – вентилятор-аспиратор; 9 – звено каркаса сдвижного зонта; 11 – загрузочное отверстие; 13 – неподвижная заслонка клапана – смесителя; 14 – камера смешивания клапана-смесителя; 15 – поворотная заслонка клапана-смесителя; 16 – аэрожелоб; 17 – грузонесущая перфорированная перегородка; 18 – каркас камеры сушки; 19 – наружная оболочка из воздухо- непроницаемой и водоотталкивающей ткани; 20 – внутренняя боковая поверхность из ткани для сит; 21 – надсушильное пространство

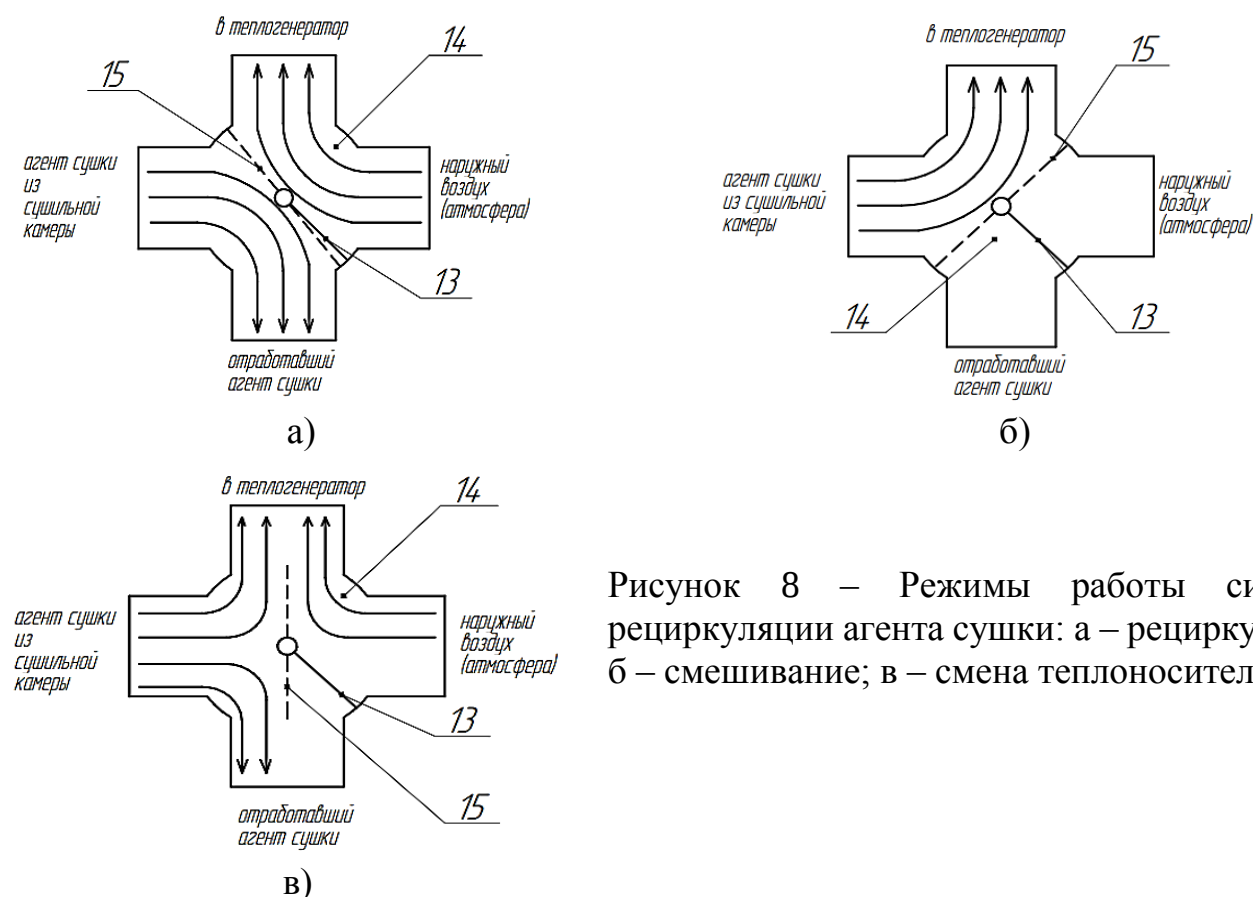


Рисунок 8 – Режимы работы системы рециркуляции агента сушки: а – рециркуляция; б – смешивание; в – смена теплоносителя

В третьем разделе «Программа и методика научного исследования» описано: изготовление аэродинамического устройства для сушки зерна с системой рециркуляции агента сушки; исследование качества работы устройства, оснащенного системой рециркуляции агента сушки при частичном подмешивании свежего воздуха и без подмешивания, определение оптимальных режимов его работы; проведение технико-экономической оценки результатов научного исследования.

Для определения аэродинамических характеристик в камере сушки аэродинамического устройства для сушки зерна провели исследования распределения потоков воздуха в зависимости от положения заслонок в распределяющем воздухоподводящем патрубке (рисунок 9).

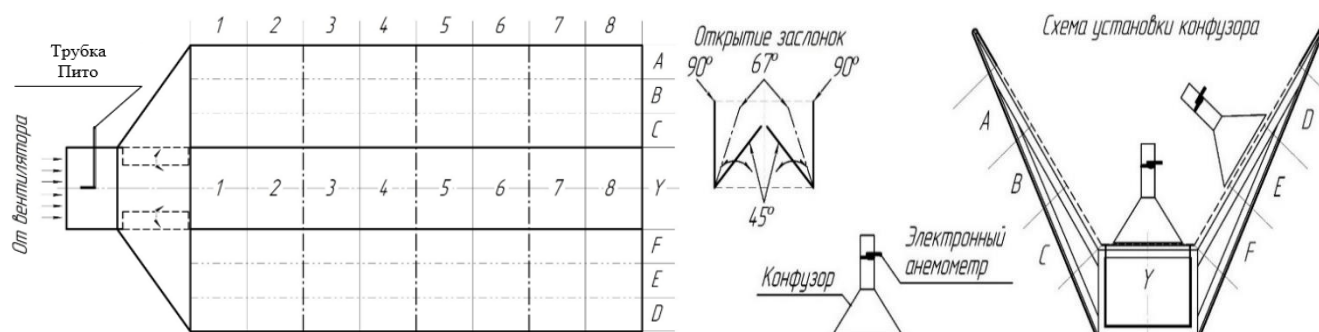


Рисунок 9 – Схема расположения мест замера аэродинамических характеристик в камере сушки: A, B, C, Y, D, E, F – горизонтальные плоскости замеров; 1 – 8 – ячейки замеров расхода воздуха на поверхности боковых воздухоподводящих полостей и жесткой перфорированной грузонесущей перегородки

Исследовали распределение воздушных потоков на поверхности зерна в камере сушки работающей системы рециркуляции агента сушки аэродинамического устройства для сушки зерна в местах 1*... 12* сечений А, В, С, D, в соответствии со схемой (рисунок 10) в зависимости от положения поворотной заслонки клапана-смесителя, где оно устанавливалось в следующие положения (рисунок 7): «заслонка закрыта» полная рециркуляция отработавшего агента сушки, «частичное подмешивание свежего воздуха» открытие 10–20 % площади патрубка рециркуляции, «заслонка открыта» полная смена агента сушки.

Рисунок 10 – Схема мест замера влажности и расхода отработавшего агента сушки на поверхности зерна: 1* – 12* – места замеров влажности и расхода отработавшего агента сушки на поверхности материала в сечениях А, В, С, D

Производственные испытания аэродинамического устройства для сушки зерна проводили следующим образом: загружали камеру сушки яровым ячменем и измеряли его влажность; для выхода на режим переводили поворотную заслонку клапана-смесителя в закрытое положение. Закрывали сдвижной зонт камеры сушки, запускали вентиляторы и теплогенератор. После достижения необходимой температуры агента сушки поворотную заслонку переводили в открытое положение, при котором осуществлялась рециркуляция агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха. Температура отработавшего агента на выходе из камеры сушки должна была находиться в диапазоне, соответствующему двух – пятикратному повторному использованию теплоты отработавшего агента сушку в зависимости от заданного температурного режима. При достижении кондиционной влажности зернового вороха выключали теплогенератор, поворотную заслонку клапана-смесителя переводили в открытое положение, охлаждали зерно.

Система автоматического управления поворотной заслонкой четырехходового клапана-смесителя воздушных потоков осуществляет поддержание требуемого значения относительной влажности агента сушки путем установки и удержания поворотной заслонки в положении, которое определено теоретическим расчетом. Для поддержания заданного значения и обмена данными с датчиком и исполнительными механизмами была написана программа в среде программирования OWEN Logic на языке FBD для программируемого реле ПР200. Основой программы выступает ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор), который является

устройством обратной связи, используемым для регулирования процесса подмешивания свежего воздуха. ПИД регулятору задаются значения на вход – это текущее значение относительной влажности агента сушки и уставка 70 %, на выходе получают управляющее воздействие на поворотную заслонку клапана-смесителя в виде напряжения от 0 до 10 вольт.

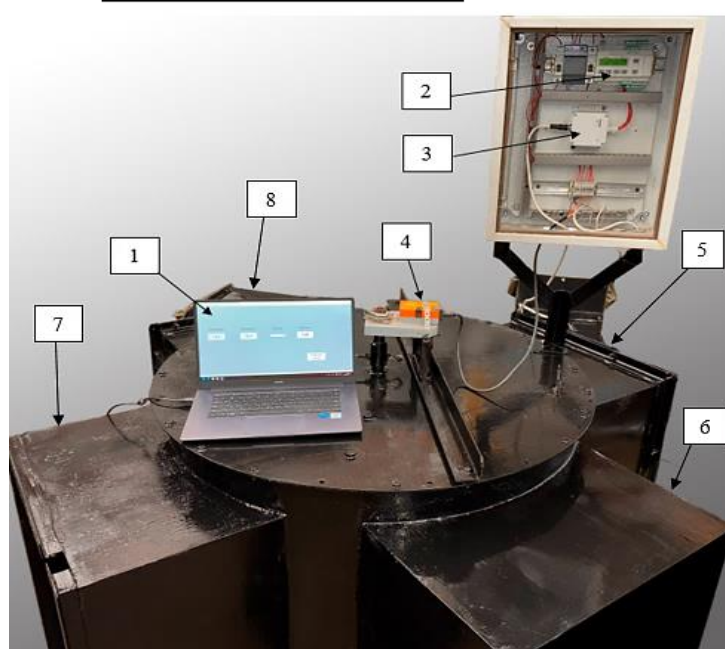


Рисунок 11 – Система автоматического управления поворотной заслонкой клапана-смесителя системы рециркуляции: 1 – монитор программы SimpLight; 2 – программируемое реле ПР200; 3 – температуры и влажности воздуха ПВТ110; 4 – электропривод Belimo GM24, на оси повторной заслонки; 5 – патрубок рециркуляции агента сушки; 6 – патрубок впуска наружного воздуха; 7 – патрубок выброса отработавшего агента сушки в атмосферу; 8 – патрубок выхода агента сушки из зерносушилки

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты лабораторного исследования аэродинамических характеристик камеры сушки, которые показали, что расход воздуха, проходящего через перфорированную грузонесущую перегородку в плоскости Y (рисунок 9) при открытых заслонках, выше, чем через боковые сита. Это связано с высоким живым сечением тканевых сит, что приводит к резкому снижению скорости воздуха в месте замера, т.к. воздух выбирает путь с наименьшим аэродинамическим сопротивлением. Расход воздуха в средней части перфорированной грузонесущей перегородки – плоскость Y выше, чем в её начале и в конце. Это связано высоким динамическим давлением, и, как следствие, пониженным статическим давлением воздуха на начальном участке распределительного клиновидного канала незаполненного зерном аэрожелоба и падением скорости воздуха в конце перегородки из-за отсутствия зернового вороха, «подпора зерна» на грузонесущей перегородке.

Результаты исследования влияния системы рециркуляции на распределение агента сушки в заполненной зерном сушильной камере представлены на таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Влияние режимов работы и системы рециркуляции на равномерность распределения расхода отработанного агента сушки по длине камеры сушки с зерном

Параметры	Режимы работы аэродинамического устройства для сушки зерна с оснащенной разработанной системой рециркуляции агента сушки (управление режимами производится клапаном-смесителем)				
	без системы рециркуляции	клапан-смеситель закрыт (полная рециркуляция агента сушки)	Открытие 10 % площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя	Открытие 20 % площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя	Смена агента сушки, клапан-смеситель открыт
Левая сторона камеры сушки					
Коэффициент вариации v , %	9,74	7,44	9,31	6,25	4,78
Центральная часть камеры сушки					
Коэффициент вариации v , %	12,92	10,25	8,65	7,76	12,16
Правая сторона камеры сушки					
Коэффициент вариации v , %	8,40	4,62	8,57	8,41	7,97

Система рециркуляции отработавшего агента сушки способствует более равномерному распределению агента по длине камеры сушки. Коэффициент вариации скорости агента сушки при выходе из зернового слоя на всех режимах работы тепловентиляционной системы меньше, чем при использовании конструкции сушилки без системы рециркуляции агента сушки.

Таблица 2 – Влияние режимов работы и системы рециркуляции на распределение расхода отработанного агента по ширине камеры сушки с зерном

Режимы работы аэродинамического устройства для сушки зерна с оснащенной разработанной системой рециркуляции агента сушки (управление режимами за счет клапана-смесителя)	Коэффициент вариации v , %, в сечении камеры сушки			
	A	B	C	D
Без системы рециркуляции	19,2	17,9	17,4	26,4
Клапан-смеситель закрыт (полная рециркуляция агента)	23,9	29,6	23,7	28,0
Открытие 10 % площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя	24,1	30,2	17,4	21,4
Открытие 20 % площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя	21,3	25,2	22,3	21,7
Смена агента сушки, клапан-смеситель открыт	17,8	24,2	17,6	23,5

По ширине камеры сушки система рециркуляции вызывает увеличение скорости фильтрации агента сушки через зерновой слой, находящийся на боковых стенках аэрожелоба, коэффициент вариации возрастает. Это происходит по причине дополнительного воздушного потока, создаваемого вентилятором аспиратором системы рециркуляции, который идет по пути наименьшего сопротивления. В соответствии с конструктивными особенностями толщина слоя зерна на боковых стенках аэродинамического устройства меньше, чем над грузонесущей перегородкой.

Средний расход агента сушки в различных режимах работы системы рециркуляции представлен на рисунке 12.

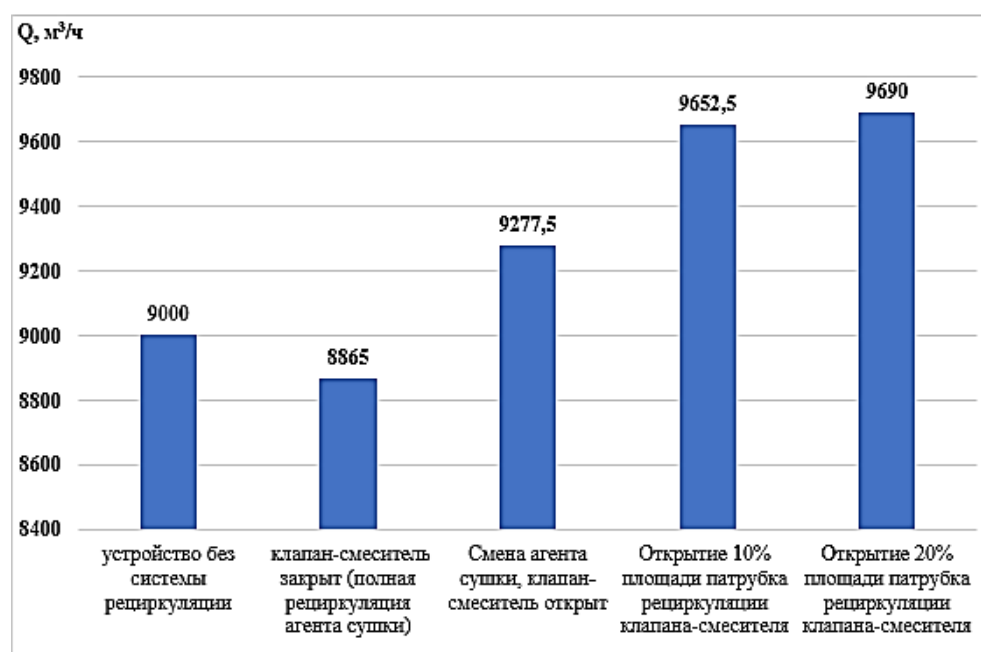


Рисунок 12 – Средний расход агента сушки в различных режимах работы системы рециркуляции

Распределение агента сушки более равномерно при использовании системы рециркуляции, расход воздуха увеличивается на режимах 10–20 % открытия площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя.

Производственные исследования разработанного устройства проводились в ЗАО «Шунга» Костромской области (рисунок 13).



Рисунок 13 – Аэродинамическое устройство для сушки сыпучих материалов, оснащенное разработанной системой рециркуляции агента сушки в ЗАО «Шунга» Костромской области: 1 – камера сушки; 2 – клапан-смеситель системы рециркуляции; 3 – теплогенератор; 4 – вентилятор аспиратор системы рециркуляции; 5 – воздуховоды; 6 – сдвижной зонт камеры сушки системы рециркуляции

Влияние режимов работы аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащенного разработанной системой рециркуляции агента сушки на интегральный расход энергии приведено на рисунке 14.

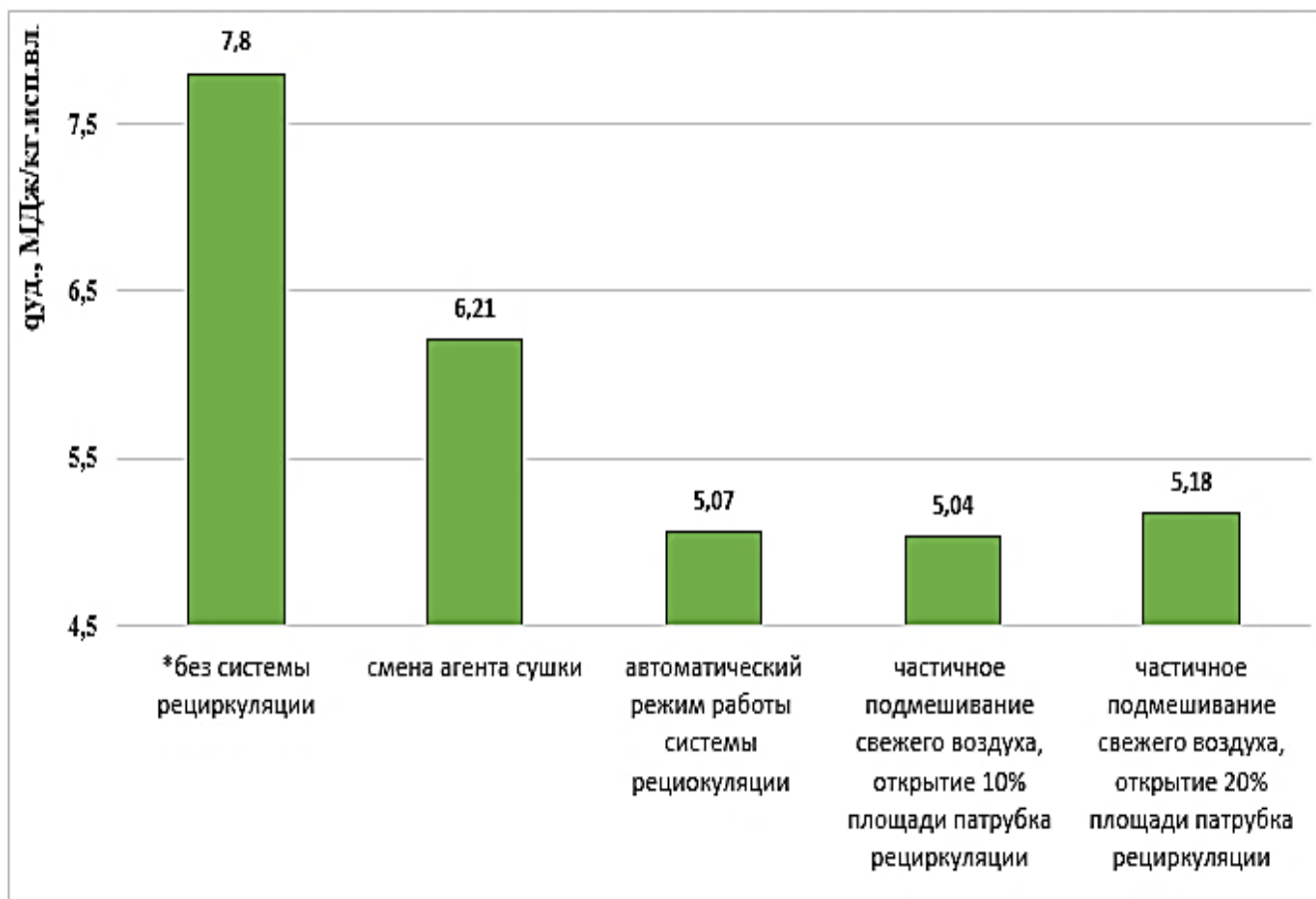


Рисунок 14 – Интегральный расход энергии на сушку зерна в зависимости от режимов работы системы рециркуляции агента сушки

В пятом разделе «Экономическая эффективность» приведены результаты расчетов технико-экономических показателей разработанного аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащённого системой рециркуляции агента сушки. Расчет комплексного показателя совершенства конструкции зерновой сушилки показал, что аэродинамического устройства для сушки зерна с $K_p = 1,23 \text{ (МДж} \cdot \text{т} \cdot \text{ч}^2) / (\text{пл. т} \cdot \text{кг. исп. вл.})$ находится в двойке лучших, уступая бункерной сушилке «Fratelli Pedrotti», серии Large, где $K_p = 0,91 \text{ (МДж} \cdot \text{т} \cdot \text{ч}^2) / (\text{пл. т} \cdot \text{кг. исп. вл.})$. Экономическая эффективность сушки зерна на разработанном устройстве в сравнении с сушкой зерна на приемном устройстве с аэрожелобом УПА–15 за счет повторного использования теплоты агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха выше, так как снижаются эксплуатационные издержки с 2729,88 до 1554,25 руб./пл. т., а годовая экономия при сушке 400 плановых тонн зерна составит 587,8 тыс. руб. Срок окупаемости 2,96 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для оценки совершенства конструкции зерновой сушилки предложен обобщенный критерий – «комплексный показатель совершенства конструкции сушилки»,

который учитывает удельную металлоемкость конструкции, удельный расход теплоты и стоимость сушилки.

2. Для обоснованного выбора рациональных режимов работы тепловентиляционной системы при конвективной сушке зерна разработаны модели ее работы при повторном использовании теплоты отработавшего агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха. Наилучшее использование теплоты агента сушки для испарения влаги из зерна при температуре агента сушки 70 °С достигается при двух – трехкратном его использовании. При этом интегральный расход энергии снижается на 14,1 %. При температуре агента сушки 100 °С четырех – пятикратное повторное использование его теплоты снижает интегральный расход энергии на 17,9 %. Контрольные параметры агента сушки на выходе из сушильной камеры, необходимые для удержания тепловентиляционной системы в рациональном режиме следующие: при нагреве агента сушки в теплогенераторе до 70 °С с подмешиванием 10 % свежего воздуха - относительная влажность 70 %, температура – 39...43 °С; при нагреве агента сушки в теплогенераторе до 100 °С – относительная влажность 70 %, температура – 55...58 °С. На всех исследуемых режимах конденсация влаги в сушильной камере отсутствует, так как температура точки росы ниже температуры зерна на 5,7...7,1 °С.

3. Разработана конструкция нового аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащенного системой рециркуляции агента сушки, работающей в ручном и автоматическом режимах (патент РФ на изобретение № 2777996). Скорость фильтрации подогретого воздуха через зерно при работе аэродинамического устройства для сушки зерна с применением системы рециркуляции агента сушки увеличивается на 3,08...7,67 % и варьируется от 0,176 м/с при закрытом клапане-смесителе до 0,192 м/с при открытии 20 % патрубка рециркуляции клапана-смесителя. Система рециркуляции обеспечивает более высокую равномерность распределения агента сушки по длине камеры – коэффициент вариации снижется с 10,35 до 8,01 %, что благоприятно отражается на равномерности сушки и стабильности выгрузки зерна.

4. Использование системы рециркуляции агента сушки с четырехходовым клапаном – смесителем, оснащенной автоматикой наиболее эффективно при открытии 10...20 % площади патрубка рециркуляции, снижает интегральный расход энергии – на 35,38 % с 7,8 до 5,04 МДж/кг. исп. вл. при удовлетворительном качестве зерна после сушки.

5. Экономическая эффективность сушки зерна на разработанном устройстве в сравнении с сушкой зерна на приемном устройстве с аэрожелобом УПА-15 за счет повторного использования агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха выше, так как снижаются эксплуатационные издержки с 82,77 до 46,03 руб./пл.т., а годовая экономия при сушке 400 плановых тонн зерна составит 583,5 тыс. руб.

Рекомендации производству. Применять разработанное аэродинамического устройство для сушки, вентилирования зерна в сельскохозяйственных предприятиях с суточным поступлением зерна на сушку до 30 т.

Перспективы дальнейшего развития темы. Дальнейшее повышение эффективности аэродинамического устройства возможно за счет применения рекуперативного теплообменника в клапане-смесителе системы рециркуляции отработавшего агента сушки.

Возможно усовершенствование системы выгрузки аэродинамического устройства для сушки зерна.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Коваленко, Р. М. Классификация и направления совершенствования передвижных зерновых сушилок / М. С. Волхонов, И. А. Мамаева, Р. М. Коваленко, М. М. Беляков // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2021. – № 3(36). – С. 53–62. – 0,73 п.л. (авторских – 0,55 п.л.)

2. Коваленко, Р. М. Теплотехническая эффективность рециркуляции агента сушки при подмешивании свежего воздуха / М. С. Волхонов, Р. М. Коваленко, И. Б. Зимин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 1(69). – С. 171–178. – 0,51 п.л. (авторских – 0,35 п.л.)

3. Коваленко, Р. М. Система управления рециркуляцией агента сушки в аэродинамической сушилке / Волхонов М. С., Коваленко Р. М., Зимин И. Б. // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 2(82). – С. 153–160. – 0,68 п.л. (авторских – 0,5 п.л.)

4. Коваленко, Р. М. Результаты испытаний усовершенствованного аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов. / М. С. Волхонов, Р. М. Коваленко, А. В. Храмешин // Нива Поволжья. – 2025. – № 2(74) – С. 3001. – 0,82 п.л. (авторских – 0,6 п.л.)

Патенты

5. Патент № 2777996 Российская Федерация, МПК F26В. Аэродинамическое устройство для сушки сыпучих материалов / М. С. Волхонов, И. А. Смирнов, Р. М. Коваленко; патентообладатель ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», заявл. 11.06.2021, опубл. 12.02.2022. Бюл. № 23. – 12 с. – 0,25 п.л. (авторских – 0,18 п.л.)

Подписано в печать 28.08.2025 г.

Формат 60х90, 1/16. Бумага писчая. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,00. Уч.–изд. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № 196

Отпечатано в ООО «Костромской печатный дом» с оригинал-макета
156000, г. Кострома, ул. Мясницкая, д. 43а, корпус Б.