

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Костромская государственная сельскохозяйственная академия»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
Волхонов Михаил Станиславович

Караево – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Анализ способов сушки зерна	11
1.2 Основные виды передвижных зерновых сушилок	14
1.3 Анализ способов снижения энергоемкости процессов сушки	19
1.4 Обзор сушилок, реализующих повторное использование отработавшего агента сушки и работ, направленных на теоретический анализ эффективности повторного использования агента сушки.....	26
1.5 Выводы по разделу, цель и задачи научного исследования	31
2 ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АГЕНТА СУШКИ	32
2.1 Обоснование критерия (показателя) оценки совершенства конструкции зерновых сушилок.....	32
2.2 Разработка конструкции и схемы работы аэродинамического устройства для сушки зерна.....	34
2.3 Теоретическое обоснование теплотехнической эффективности рециркуляции агента сушки при постоянном подмешивании свежего воздуха и рациональных режимных параметров работы аэродинамического устройства для сушки зерна.....	39
2.4 Теоретическое обоснование теплотехнической эффективности рециркуляции сушильного агента при однократном подмешивании свежего воздуха и рациональных режимных параметров работы аэродинамического устройства для сушки зерна.....	50
2.5 Теоретическое обоснование целесообразности применения рециркуляции отработавшего агента сушки по условию конденсации влаги.....	53
2.6 Влияние режимов работы системы рециркуляции агента сушки на аэродинамическую характеристику сети.....	55
Выводы по разделу	57
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	59
3.1 Описание экспериментальных и производственных установок	59
3.2 Измерительные приборы	61
3.1 Методика лабораторного исследования определения аэродинамических характеристик камеры сушки	67

3.2	Методика определения влияния системы рециркуляции на распределение агента сушки в заполненной зерном сушильной камере	70
3.3	Методика проведения производственных испытаний аэродинамического устройства для сушки зерна.....	75
3.4	Методика управления заслонкой клапана-смесителя системы рециркуляции отработавшего агента сушки аэродинамического устройства для сушки зерна	80
4	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	88
4.1	Результаты лабораторного исследования аэродинамических характеристик камеры сушки	88
4.2	Результаты исследования влияния системы рециркуляции на распределение агента сушки в заполненной зерном сушильной камере.....	92
4.3	Результаты производственных испытаний аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащенного системой рециркуляции агента сушки.....	101
	Выводы по разделу	105
5	ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	107
5.1	Стоимость изготовления устройства.....	107
5.2	Эксплуатационные издержки	111
	Выводы по разделу	116
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	136
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	150
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	162
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	164
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д	166
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	169
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	171
	ПРИЛОЖЕНИЕ З	174
	ПРИЛОЖЕНИЕ И	179
	ПРИЛОЖЕНИЕ К	184

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Зерно является одним из основных сельскохозяйственных продуктов, и увеличение его производства было и остается ключевой проблемой развития сельского хозяйства [36; 55; 124]. В России в 2024 году сбор зерна составил около 130 млн тонн, в том числе 83 млн тонн пшеницы [28; 98].

В климатических условиях нечерноземной зоны России существует необходимость в сушке и активном вентилировании практически всего собранного зерна [20]. Во всей технологической цепочке послеуборочная обработка зерна занимает лидирующие позиции по ресурсоемкости процесса. Затраты топлива на нее могут достигать 50 %, электроэнергии до 98 % и 15...20 % эксплуатационных затрат от всего количества [46; 126]. Сушка – основная и наиболее сложная технологическая операция послеуборочной обработки зерна [34; 130].

По состоянию на начало 2025 года агропромышленный комплекс в России находится в состоянии импортозамещения, так как основной проблемой АПК в наше время остается зарубежная база сельскохозяйственной техники [87]. «Активный переход российских сельхозтоваропроизводителей от импортных зерновых сушилок к отечественным создаёт благоприятные условия для разработки и внедрения в производство современных технологий послеуборочной обработки зерна» [20].

«Непрерывное увеличение производства зерна и семян других сельскохозяйственных культур требует значительного прироста мощности зерносушильного парка и повышения эффективности работы зерносушилок. Для обеспечения сельского хозяйства семенами высокого качества зерносушилки должны отвечать технологическим требованиям сушки различных семян. Сегодня при выборе оборудования для сушки зерна определяющими факторами являются ее производительность, экономичность, расход топлива, долговечность, цена. Чем суровее климатическая зона, тем выше требования к сушильному агрегату. Сельхозпроизводители вынуждены постоянно изучать рынок в поисках инновационных конструкций и

технологий сушки зерна, обеспечивающих быструю окупаемость затрат и качественный продукт на выходе» [16]. Для максимальной эффективности сушки зерна необходимо сократить энергозатраты, что является приоритетным направлением в данной отрасли.

«Сравнительные исследования путей экономии энергии при различных способах сушки показывают, что при комбинированной сушке достигается до 25% экономии энергии; отказ от теплообменников дает до 20 % экономии; частичная рециркуляция отработавшего агента сушки и охлаждающего воздуха обеспечивает экономию энергии в размере 5...10 %; автоматизация процесса сушки обеспечивает дополнительное снижение энергоемкости процесса на 3...5 %; теплоизоляция и герметизация сушилки обеспечивает 2...3 % экономии теплоты.

Наиболее перспективным способом снижения энергозатрат на сушку зерна является повторное использование теплоты отработавшего агента сушки, который может включать в себя возврат слабонасыщенного влагой отработавшего агента сушки и воздуха в зоны сушки более влажного зерна; смешивание части отработавшего агента сушки с топочными газами или нагретым в теплогенераторе воздухом; утилизацией – рекуперацией теплоты агента сушки» [21].

«Рециркуляция 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. Это предотвращает недогрев или перегрев отдельных участков зернового слоя, что обеспечивает одинаковое качество сушки для всего объема зерна» [20].

Известно, что использование остаточной теплоты отработанного воздуха способствует повышению эффективности процесса сушки [10], так как тепловой потенциал отработавшего агента сушки, выбрасываясь в атмосферу, не используется в полной мере. На сегодняшний день в российском и зарубежном зерносушении известен опыт повторного использования теплоты отработавшего агента сушки [44; 103]. Исследователи [61; 108; 115] отмечают, что до 60 % всех производительных затрат теплоты в зерносушилках могут быть компенсированы за счет

утилизации теплоты отработавшего теплоносителя и охлаждающего воздуха.

«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, пыль является взрыво – и пожароопасной, содержит вредные вещества, влияющие на здоровье операторов» [20].

«Использование сушилок аэродинамического типа позволяет минимизировать травмирование зерна» [20]. «Сегодня в условиях импортозамещения аэродинамические устройства находят широкое применение при послеуборочной обработке зерна, бобовых, масличных культур и сыпучих семян трав для приёма и временного их хранения» [21]. «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» [20]. «Эти установки простые в устройстве, обслуживании, универсальные, однако, их использование в качестве сушилок сдерживается по причине достаточно высоких удельных затрат на сушку – свыше 7,8 МДж/кг.исп.вл.» [21].

Степень разработанности темы. Научными исследованиями в области снижения энергоёмкости 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. Роцин, В.А. Смелик, А.Г. Чижиков, А.Г. Чижов и другие.

Несмотря на большое количество научно-исследовательских работ [41; 50; 79; 115], в которых рассматриваются вопросы снижения энергоёмкости 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.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

– 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, оснащённого системой рециркуляции агента сушки, определить оптимальный режим его работы;

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

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.

Гипотеза исследования. Если использовать систему рециркуляции агента сушки с системой автоматического управления режимами работы четырехходового клапана-смесителя, то это позволит снизить удельные энергозатраты на технологический процесс сушки зерна без снижения его качества.

Научная новизна заключается:

- в разработанном критерии (показателе) оценки совершенства конструкции зерновых сушилок;
- в разработанной конструктивно-технологической схеме аэродинамического устройств для сушки зерна (патент РФ на изобретение № 2777996);
- в графоаналитическом обосновании эффективных режимов работы системы рециркуляции агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха;
- в конструктивно-технологической схеме и обосновании режимов работы четырехходового клапана-смесителя системы рециркуляции агента сушки, оснащенной 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.

Методология и методы 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;

– конструктивно-технологическая схема нового аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащённого системой рециркуляции агента сушки, работающей в ручном и автоматическом режимах;

– результаты лабораторных исследований и производственные испытания работы аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащённого системой рециркуляции агента сушки;

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

Апробация 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 ру-

бежом» 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 при сушке зерна.

Структура и объем 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. В приложениях приведены документы, подтверждающие апробацию работы, и другие вспомогательные материалы.

Диссертационная работа оформлена в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11 [28].

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ способов сушки зерна

Сушка зерна – важный этап после сбора урожая, поскольку зерно без сушки и вентилирования склонно к самосогреванию и загниванию. Для сохранения качества и продления срока хранения зерна требуется сушка. В процессе сушки используется специальное оборудование и технологии для эффективного удаления лишней влаги. Благодаря качественной сушке обеспечивается длительное хранение зерна с требуемым классом и качеством. Одно из условий качественной обработки посевной продукции заключается в том, что в сердцевине зерна давление пара должно быть меньше атмосферного давления. Влажность в этом случае переходит от центра к периферии, однако данный переход должен быть не очень быстрым. При повышенной температуре оболочка зерен может сгореть, поэтому при сушке нужно применять специальные технологии. Основными задачами обработки зерна являются: дозревание, обеззараживание, сохранение качества, обеспечение хранения в течение длительного времени [114].

На сегодняшний день известны следующие способы сушки зерна: радиационно – солнечный, конвективный, кондуктивный – контактный, с помощью ТВЧ и СВЧ, в вакууме, сушка инфракрасными лучами, акустический. Рассматривая данные способы можно отметить, что в зависимости от региона и погодных условий широкое применение получили первые 3 способа.

Солнечная сушка является одним из наиболее древних и экономически выгодных способов сушки зерна. Он основывается на использовании солнечного тепла для высушивания зерна, что позволяет экономить на затратах на топливо. Такой метод считается экологически чистым и не требует сложного оборудования. Однако, солнечная сушка имеет свои ограничения, в том числе зависимость от клима-

тических условий. Этот метод эффективен в основном в районах с хорошей солнечной активностью и температурой воздуха не ниже 25 градусов, что ограничивает его применимость. В целом, солнечная сушка остается важным и экономически привлекательным методом сушки зерна, однако для его успешного применения необходимо учитывать различные факторы, такие как географические особенности и климатические условия [12].

Конвективный способ сушки, как отмечал С.Д. Птицын [93], является одним из наиболее доступных и широко применяемых методов сушки материалов, во время которой теплота передается зерну конвекцией от движущегося агента сушки. Агент сушки наряду с передачей теплоты поглощает и удаляет влагу из зерна [53]. Данный метод позволяет сократить длительность сушки продуктов в 7 – 10 раз по сравнению с естественной сушкой, применение в различных районах независимо от погодных условий; возможность высушить высоко-влажное зерно от 25%; зерно не соприкасается с нагретыми поверхностями. Недостатками являются: сушильные установки имеют высокие удельные энергозатраты (от 1,6 до 2,5 кВт-ч/кг), возникает несколько проблем, таких как потери теплоты, снижение качества продукта и потери витаминов и биологически активных веществ. Повышение температуры и продолжительности сушки может привести к окислительным процессам, которые отрицательно сказываются на продукте [91].

Так же применение нашел и кондуктивный - контактный способ сушки, при котором теплота, которая требуется для испарения влаги, подводится к зерну от нагреваемых поверхностей или от нагреваемого зерна «метод сковородки». Для сушки продуктов питания этот способ используется нечасто. Высокого качества конечного продукта достичь не удастся вследствие неравномерности его влажности и потери питательных веществ из-за перегрева. Большое применение этот способ находит при сушке пиломатериалов, а также сырья и продукции в текстильной промышленности [91].

Одним из наиболее ограниченных в применении является сорбционный способ сушки, при котором влажное зерно смешивается с влагопоглощающими материалами такими как опилки, силикагель, хлористый кальций, сульфат натрия или с

более сухим зерном. Разновидностью этого способа является химическая сушка. Ее наиболее целесообразно применять для снижения влажности семян бобовых культур таких как: вика, горох, соя, фасоль. Вследствие плотных семенных оболочек и высокого содержания белка эти семена очень плохо отдают влагу при тепловой сушке. Данный способ основан на высокой водопоглощительной способности некоторых химических веществ, в частности, технического сульфата натрия (Na_2SO_4) или природного озерно-морского минерала – Мирабилита, влажностью 1...5 %. Сушку ведут, смешивая порошок с семенами [58]. Достоинства способа – семена бобовых культур не растрескиваются. Недостатки данного способа: наличие отдельного помещения для смешивания препаратов; перемешивание семян производят часто – 3...4 раза за сутки; высокая продолжительность сушки 5...10 суток; затраты на сепарацию зерновой массы от сорбента; невозможность повторного использования сорбента, только после сушки. Высокая стоимость и трудоемкость химического способа сушки ограничивает его применение.

Отметим способ сушки зерна в вакууме, сущность которого заключается в следующем: тепло в вакуум-сушилках сообщается зерну от нагреваемых поверхностей, например, паровых трубок, а испаряемую влагу откачивает вакуум-насос. Достоинством этого способа является то, что в вакууме процесс проходит так же, как и во время конвективной сушки; с увеличением вакуума и ростом температуры нагреваемых поверхностей увеличивается скорость сушки. Однако вакуум-сушка имеет несколько недостатков: достаточно дорога в производстве и обслуживании; не подходит для производства продуктов с высоким содержанием влаги, масла и примесей [89].

Во время радиационной сушки при помощи инфракрасного излучения происходит прямая передача теплоты от источника к зерну. Источниками могут быть специальные электрические или газовые экраны, осуществляющие нагрев до 500-1000 °С. Основное достоинство сушки инфракрасными лучами, заключается в возможности подведения к материалу значительно больших потоков теплоты, больше в 30 – 100 раз, чем во время конвективной сушки [89]. Таким образом, радиационная сушка инфракрасными лучами позволяет быстро и эффективно сушить зерно

без применения дополнительных источников теплоты, но для проведения сушки биологического термочувствительного объекта, то есть зерна, реализация данного достоинства невозможна [12].

Сушка зерна в электрическом поле токов повышенной частоты является одним из совершенных способов сушки, при котором сушка выполняется из превращения в теплоту энергии электрического поля [12]. При использовании электрического поля токов повышенной частоты происходит более равномерное нагревание зерна, что позволяет достичь более высокой эффективности сушки. Кроме того, такая сушка позволяет избежать потерь влаги. Для получения максимальной эффективности необходимо подобрать параметры электрического поля и параметры нагревания. При этом необходимо учитывать и другие факторы, влияющие на процесс сушки, в том числе температуру и влажность воздуха. Существенный недостаток, в сравнении с конвективной сушкой, – это стоимость, которая на порядок выше.

Одним из изучаемых способов сушки является акустический. Он заключается в превращении акустической энергии в тепловую с помощью ультразвуковых генераторов, где звуковые волны помогают ускорить процесс сушки и увеличить время их хранения [12]. Стоимость ультразвуковых генераторов и сложность их применения ограничивают этот способ в применении.

Таким образом, конвективный способ сушки является наиболее доступным и широко применяемым методом сушки материалов.

1.2 Основные виды передвижных зерновых сушилок

«В условиях российского климата в большинстве регионов сбор урожая зерновых совпадает с периодом обильных осадков, поэтому влажность урожая выше кондиционной. В Нечерноземной зоне РФ слабым звеном в технологической линии послеуборочной обработки зерна является сушилка. По ее производительности

можно судить о производительности всего зерноочистительно-сушильного пункта (ЗОСП), в состав которого она входит. В настоящее время на многих предприятиях применяются неэффективные технологии послеуборочной обработки зерна, используется оборудование с высоким физическим и моральным износом. Так, согласно данным департамента АПК Костромской области, количество ЗОСП в регионе за последние десять лет уменьшилось на 38%, заменено сушилок на новые – 15 штук, остальные 120 – эксплуатируются, в среднем, начиная с 1975 года. Сушильный парк изношен на 80%, замена техники производится медленно из-за высокой стоимости оборудования. Как правило, в открытых источниках приводится неполная и несистематизированная информация о характеристиках выпускаемых в мире передвижных сушилок зернового вороха и отсутствует их классификация, что значительно осложняет анализ и выбор при покупке для сельскохозяйственных предприятий» [16].

«Существующая классификация зерносушилок охватывает все сушилки без выделения передвижных, так, например, различают зерносушилки малой – до 2,5 т/ч, средней – до 15 т/ч и высокой производительности – более 15 т/ч» [16].

«Сушилки непрерывного действия являются экономически более выгодными установками и поэтому их применение целесообразно в условиях производства семян объемами 500 т и более. По сравнению с зерносушилкой периодического действия сушка зерна на прямоточной зерносушилке приводит к снижению затрат теплоты на 10,7 % и повышению коэффициента полезного действия сушилки с 37,5 до 42 %. Повышение технико-экономических характеристик сушилки происходит за счёт: более полного использования сушильной камеры, так как исключаются ее простои во время загрузки и разгрузки; лучших условий для контроля и автоматизации процесса сушки; возможностью использования в поточных технологических линиях, так как эти сушилки не требуют периодического прогрева. К недостаткам относят неравномерность движения зерна по сечению рабочей камеры и, как следствие этого, неравномерность его нагрева и сушки» [16].

«Тем не менее передвижным зерновым сушилкам сегодня уделяется особое внимание, они обладают рядом преимуществ: мобильность, так как не требуется

строительство технических сооружений и фундаментов; автономность: возможность работы на дизельном, газовом или твердом топливе. С целью составления классификации передвижных зерновых сушилок (рисунок 1.1) проведен анализ технико-экономических показателей сушилок, выпускаемых в мире» [16].

«Установки периодического действия позволяют размещать большое количество урожая, не требуют больших капитальных затрат, просты в обслуживании и надежны в эксплуатации. Большинство из них универсальны и пригодны для сушки большого набора растительных материалов. Достоинствами таких сушилок являются простота конструкции, возможность регулирования режима сушки путем подачи агента сушки с различными параметрами на разных этапах сушки, повышение равномерности сушки за счёт перемешивания зерна с помощью шнеков, расположенных в слое, реверсирования продувки зернового слоя. К основным недостаткам относят простои во время загрузки и выгрузки зерна, произвольные потери теплоты на прогрев сушилки после загрузки в нее очередной партии зерна, неэффективное использование транспортного оборудования. Энергоемкость зерносушилок периодического действия достигает 6700 кДж/ (кг. исп. вл.), а коэффициент полезного действия – 37,5%» [16].

«Различают два способа передвижения сушилок – по автомобильной или по железной дороге. Оба способа передвижения имеют свои плюсы и минусы, но более универсальным в современном мире считаются те сушилки, которые могут передвигаться по дорогам общего пользования» [16].

«В России на практике из передвижных зерносушилок наибольшее распространение получили шахтные и бункерные. Сушилки шахтного типа обладают компактностью, высокой степенью использования объёма рабочей камеры, простотой изготовления, возможностью в одной шахте сушить широкий спектр сыпучих культур. Недостатками этих сушилок являются неравномерная сушка зерна повышенной влажности, постоянное засорение шахт и сложная очистка, необходимость обязательного очищения зерновой массы от примесей перед сушкой, повторная сушка высоковлажной массы, травмирование зерна во время движения по шахте, ограниченный съём влаги за один пропуск зерна через шахту» [16].

«Особого внимания сегодня заслуживают передвижные бункерные сушилки по причинам их доступности и простоты. К конструктивным особенностям бункерных сушилок относят использование сетчатой наружной стенки сушилки с большим коэффициентом живого сечения, использование большей по диаметру и меньшей по высоте центральной воздухоподающей камеры, а также высокую автоматизацию процесса сушки, использование двух шнековых транспортёров, которые обеспечивают загрузку и рециркуляцию семян в процессе сушки. Важной конструктивной особенностью является наличие внутренней перфорированной камеры с коническим верхом для ввода агента сушки в продуваемый зерновой слой, толщина которого составляет около 50 см. К недостаткам данных сушилок относят их дороговизну, отсутствие возможности замерить влажность материала, неравномерность сушки из-за уплотнения нижних слоев зерна, длительность сушки, травмирование влажного зерна шнеками» [16].

«При рассмотрении сушилок барабанного типа выявилось большое количество недостатков в процессе эксплуатации, что и влияет сегодня на их спрос. Эти сушилки применялись для сушки зерна влажностью более 25%. К их достоинствам можно отнести возможность сушки кусковых материалов различной сыпучести, засоренности и влажности, наличие высокого коэффициента использования рабочего времени, сушка происходит примерно в 2 – 3 раза быстрее, чем в шахтных сушилках. Главный недостаток барабанных сушилок – огромный расход энергии, не менее 1,5 литра дизельного топлива и 4 кВт электроэнергии на тонну, а также сложность получения семян с высокими показателями всхожести, высокая загрязненность зерна канцерогенными веществами при сушке и высокая неравномерность сушки» [16].

«Передвижные конвейерные зерносушилки — относительно новый продукт на отечественном сельскохозяйственном рынке, где обнаруживается всего несколько моделей этого типа, однако они успешно используются по всему миру. К их достоинствам относят возможность сушить различные материалы, в том числе и малосыпучие, легкость регулирования производительности, возможность диффе-

ренцированно подавать агент сушки и перемешивать слои зерна, возможность визуального наблюдения и контроля движения, доступность рабочих органов для обслуживания. Недостатками конструкции являются громоздкость, большое количество движущихся узлов и деталей, повышенные требования к прочности конструкции, что снижает её эксплуатационную надежность» [16].

«На сегодняшний день устарели не только морально, но и технически сушилки колонкового типа по причинам низкого КПД использования агента сушки, не превышающего 8 – 10 %, и значительного истирания стенок и зерна. Кроме этого, очистка сушилки требует больших усилий, так как образуются застойные зоны при сушке зерна высокой влажности. В них существует опасность самовозгорания зерна» [16].

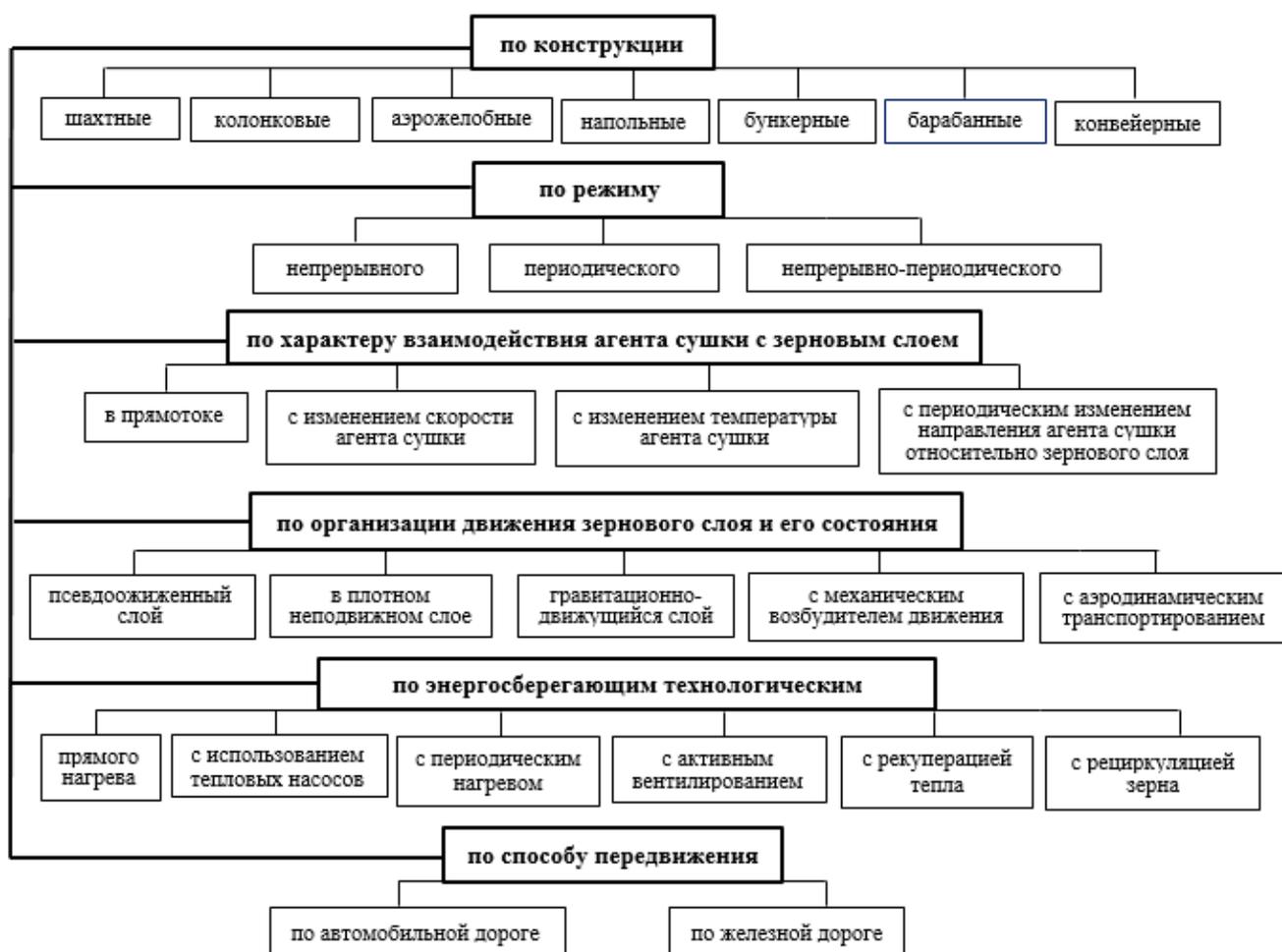


Рисунок 1.1 – Классификация передвижных зерновых сушилок

«Необходимо отметить, что сегодня в конструкциях сушилок находит отражение относительно новый технологический принцип – принцип повторного использования отработавшего агента сушки. В установках такого типа реализуется принцип герметичности, без которого процесс сопровождается выделением большого количества пыли, что, в свою очередь затрудняет оператору доступ к сушилке» [16].

1.3 Анализ способов снижения энергоемкости процессов сушки

Сушка – основная и наиболее сложная технологическая операция послеуборочной обработки зерна [34; 130]. Во всей технологической цепочке послеуборочная обработка зерна занимает лидирующие позиции по ресурсоемкости процесса. Затраты топлива на нее могут достигать 50 %, электроэнергии до 98 % и 15...20 % эксплуатационных затрат от всего количества [46; 126].

В настоящее время авторы [20; 31; 54; 97; 116 и др.] отмечают, что в контексте нарастающей напряженности в области энергетического баланса важно развивать современную технику для сушки зерна, с упором на создание сушильных установок с наиболее эффективным и экономичным потреблением энергии. В используемых в настоящее время зерносушилках применяются разнообразные технологические методы, которые помогают сделать процесс сушки более эффективным, быстрым и экономически выгодным для производителей зерна.

Эти мероприятия могут помочь в повышении эффективности сушки зерна и сокращении расхода топлива и электроэнергии, что важно для сельскохозяйственных предприятий и обеспечения их устойчивости и экономической эффективности.

Организационные мероприятия по снижению расхода топлива и электроэнергии, которые выделяет Н.И. Малин [59], представлены на рисунке 1.2.

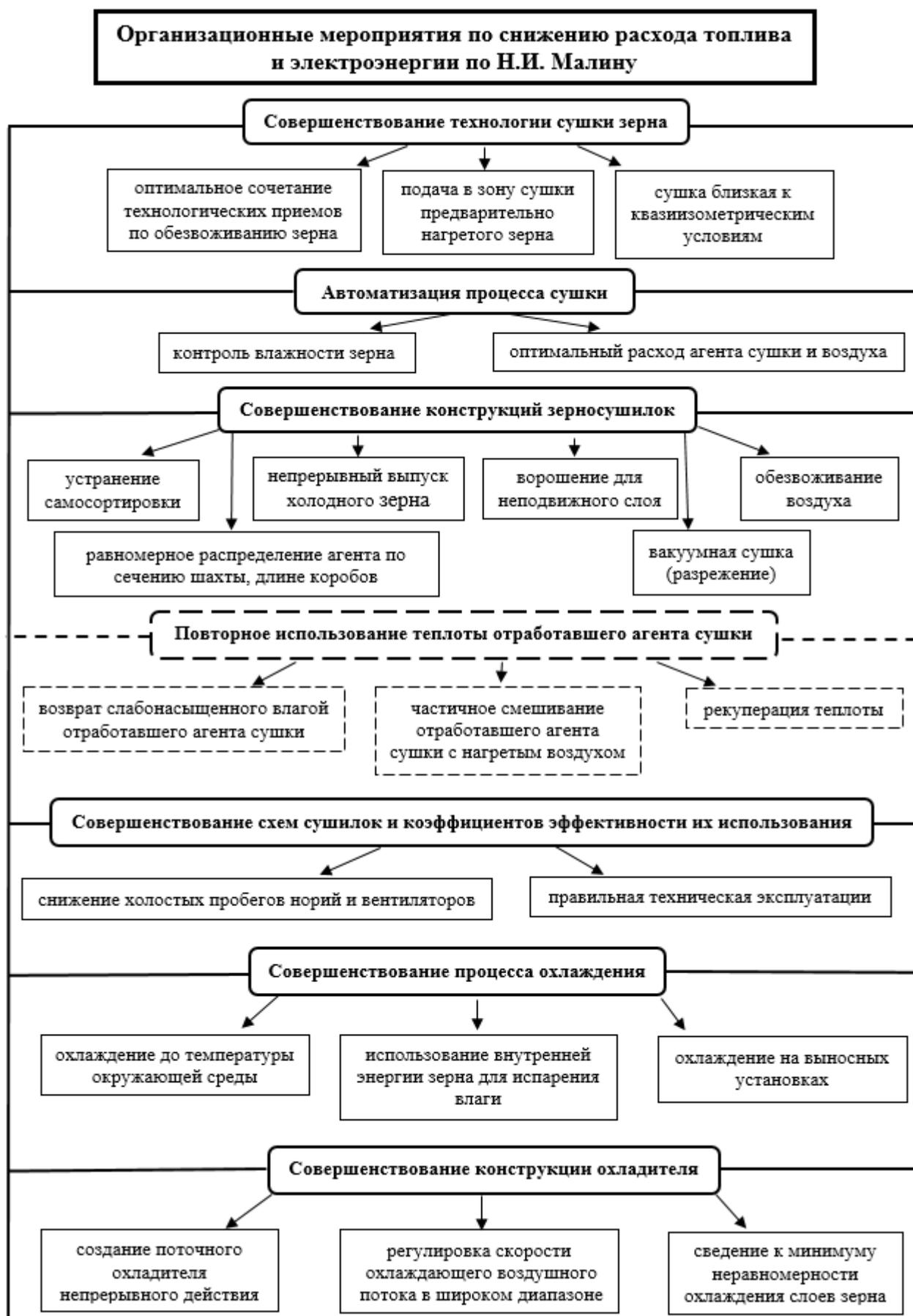


Рисунок 1.2 – Организационные мероприятия по снижению расхода топлива и электроэнергии по Н.И. Малину

По утверждениям отечественных и западные ученых, таких как Сорочинский В.Ф., Munzing K., Maltry W., Hansen R. C. и др. [13; 131; 133; 134], основными направлениями повышения производительности, снижения энергоемкости и трудоемкости процесса сушки считают автоматизацию, применение рециркуляции агента сушки, применение двухстадийной сушки – метода драэрации, увеличение температуры нагрева зерна, применение математического моделирования процесса сушки.

На сегодняшний день в российском и зарубежном зерносушении известен опыт повторного использования теплоты отработавшего агента сушки [44; 107]. Исследователи [61; 108; 115] отмечают, что до 60 % всех непроизводительных затрат теплоты в зерносушилках могут быть компенсированы за счет утилизации теплоты отработавшего теплоносителя и охлаждающего воздуха.

Повторное использование теплоты отработавшего агента сушки может быть реализовано через возврат слабонасыщенного влагой отработавшего агента сушки, частичное смешивание отработавшего агента с нагретым воздухом, рекуперацию теплоты отработавшего агента сушки.

Г.С. Окунь и А.Г. Чижиков [64], обращают внимание на трудности, возникающие при внедрении сушилок с повторным использованием отработавшего агента сушки – дополнительные затраты на воздуховоды и вентиляторы, а также затраты на фильтрующие устройства для очистки рециркулирующего теплоносителя.

Частичная рециркуляция отработавшего агента сушки и охлаждающего воздуха обеспечивает экономию топлива в размере 5...10 % [29].

Характеристики, играющие важную роль при выборе оптимального режима сушки максимально допустимые температуры нагрева, влагосъем, качественные характеристики – сохранение вкуса, цвета, запаха, питательная ценность [35; 60].

Н.И. Сычугов, С.К. Манасян, М.Ф. Машковцев и др. [24; 35; 59; 60; 62; 101; 120] считают, что предварительный подогрев зерна, рециркуляция материала и теплоносителя могут улучшить процесс сушки зерна, позволяя его сушить в потоке практически любой первоначальной влажности, достигая кондиционной конечной влажности.

Ученые Н.И. Соседов., Н.В. Шухнова [101], отмечают, что при влажном зерне коэффициент рециркуляции достигает значение 5 – 7 и даже больше, что приводит к истиранию, нарушению структуры материала и повышению расхода энергии.

Н.В. Ксенз выделил 10 основных способов снижения энергоемкости процесса сушки (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Способы снижения энергоемкости процесса сушки по Н.В. Ксензу

А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков, считают сушку до сухого состояния за один пропуск при любой исходной влажности основным условием сохранения высокого качества семян и зерна, в 1,5...2 раза использование поточной технологии уменьшает затраты труда и средств на обработку зерна. Также авторами отмечено, что предварительный подогрев и рециркуляция материала семян при сушке повышают производительность на 35 %, зерна на 23 % [25].

По имеющимся данным [60] «инерционность поля влажности в 330 раз больше, чем инерционность температурного поля». Ученые рекомендуют использовать высокотемпературные теплоносители для нагрева зерна и комбинировать

циклы нагрева и охлаждения, чтобы избежать перегрева [24; 25; 35; 57; 60; 120; 132], по их данным, это приводит к повышению качества семян.

Для равномерного распределения влаги внутри материала между оболочкой зерен и их внутренней частью, а также для повышения эффективности его охлаждения необходимо предусмотреть такой технологический прием как отлежка. Она способствует повышению качества сухого продукта и предотвращает возможные дефекты, такие как уплотнение или образование корки на поверхности и уменьшает возможность конденсации влаги [6; 60; 94; 128]. Эффективность зависит от длительности отлежки. Многочисленными исследованиями различных авторов установлено, что при смешивании зерна с различной температурой выравнивание ее между отдельными компонентами смеси происходит за незначительный промежуток времени 10–15 минут. С.Д. Птицын, В. Мальтри, Э. Пётке, Б. Шнайдер указывают, что периоды отлежки у зерновых должны быть более 24 ч.

Птицын С.Д., Третьякова Т.В., Окунь Г.С [95], указывают на то, что применение отлежки приводит к снижению натурального веса зерна. Установлено, что при одинаковой средней влажности образца, но различной степени его предварительной подсушки, скорость изменения веса различна – чем больше величина влагосъемы, тем медленнее изменяется натуральный вес. Это связано с тем, что на начальных этапах подсушки происходит быстрое удаление избыточной влаги, что влияет на последующий процесс отлежки.

Исследования Н.И. Малина свидетельствуют, что увеличение продолжительности отлежки нагретого зерна свыше 15 минут приводит к незначительному сокращению временных затрат. Отмечает, что наиболее эффективно применение отлежки для зерна влажностью до 17...18 %. По его данным, отлежка нагретого зерна пшеницы в течении 15 мин сокращает длительность процесса релаксации влаги примерно в 1,1 раза [58].

Машковцев М.Ф. [62] рекомендует использовать специальные емкости для отлежки, которые устраиваются непосредственно в самих сушилках.

Сушку комбинированным способом предлагает М.Г. Спиридонова [102], сначала в кипящем слое – для достижения высокой интенсивности обезвоживания, затем в плотном слое – обезвоживание продолжается в более мягком режиме. Способ обеспечивает равномерное удаление влаги из продукта, предотвращает пересыхание и перегрев продукта. Подобный способ сушки зерна с высокой начальной

влажностью описан в работе Захарченко И.В. [35]. Он основан на комбинации двух этапов сушки с целью сокращения энергетических затрат и оптимизации процесса обезвоживания зерна. Первый этап сушки осуществляется с использованием быстрой системы, которая направлена на удаление влаги только из верхнего слоя зерна, второй этап, включает в себя медленную сушку зерна в хранилище.

Применение комбинированной технологии сушки зерна в высокотемпературных сушилках с досушкой на установках активного вентилирования позволяет снизить энергоемкость процесса на 30...39 %. Зерно в сушилках рекомендуется сушить до влажности 15...17 %, затем вентилировать в бункерах [96].

Основные недостатки технологий комбинированной сушки высветил И.В. Захарченко [35], к которым относит: отсутствие возможности полного снятия влаги за один пропуск, травмирование влажного зерна при передаче его с агрегата на агрегат, большие площади, занимаемые дополнительным оборудованием, требующим дорогостоящих сооружений, отсутствие гарантий качества семян при влажности убранного зерна более 28 %, громоздкость и дороговизна комплекса для обработки до 20...30 тыс. т. семенного материала за сезон.

Особый интерес вызывает зарубежный практический опыт двухстадийной технологии сушки зерна. «Способы "драйэрайшн" и "супердрай", являются эффективными методами сушки зерна для снижения влажности до кондиционной с последующим охлаждением. Процесс "драйэрайшн" – высушивание зерна при высокой температуре в специальных сушилках до влажности, превышающей кондиционную на 1,5 – 2%, затем нагретое зерно отдыхает в емкостях в течение 5 – 10 часов. После этого происходит охлаждение зерна внешним воздухом, при этом подача воздуха должна быть наиболее низкой температуры с удельной подачей воздуха от 40 до 70 м³/(ч·т) в течение 6 – 12 часов. Одновременно с охлаждением происходит досушивание зерна до кондиционной влажности. Существенным отличием технологии "супердрай" является то, что после сушки зерна при высокой температуре без его охлаждения до влажности, превышающей кондиционную на 1,5 – 2%, зерно вновь нагревают примерно до 60°С, последующие действия аналогично технологии драйэрайшн. По данным фирмы Omnia, производительность сушилок на зерне кукурузы при технологии "супердрай" увеличивается до 40 %, а затраты топлива и электроэнергии уменьшаются до 30 %» [17].

Сравнительные исследования путей экономии теплоты при различных способах сушки, проведенные А.В. Голубковичем, А.Г. Чижиковым [25], показывают, «что 2...3 % экономии теплоты можно достичь от теплоизоляции, герметизации; 20 % при отказе от теплообменников; утилизацией тепла отработавшего теплоносителя и охлаждающего воздуха достигается 60 % экономии; рециркуляцией – 10 %. комбинированной сушкой – до 25 %. Автоматизация процесса сушки обеспечивает дополнительное снижение энергоемкости процесса на 3 – 5 %».

Утилизация теплоты насыщенного агента сушки с использованием специальных теплообменников и промежуточных теплоносителей позволяют повысить КПД сушки до 77,5 % (таблица 1.1 [100]).

Таблица 1.1 – Перспективы экономии топлива по В.Ф. Сорочинскому

Перспективы экономии топлива	Снижение затрат теплоты, %	КПД, %	Удельные затраты, кДж/кг.исп.вл.
Сушка в сушилке периодического действия	нет информации	37,5	6700
Сушка в прямоточной сушилке	10,7	42	5985
Отказ от теплообменника и переход на сушку с прямым нагревом сушильного агента	14,5	49,2	5110
Сушка в прямоточной сушилке с утилизацией насыщенного влагой отработавшего агента сушки, из нижней части сушильных зон	нет информации	56,9	4418
Двухстадийная сушка с применением активного вентилирования при медленном охлаждении зерна в вентилируемых бункерах, охладителях непрерывного действия, хранилищах по методу драэрации	20	61,5	4090
Прямой нагрев сушильного агента в сочетании с методом драэрации и утилизацией отработавшего агента сушки	33,5	73,9	3400
Утилизация теплоты насыщенного агента сушки с использованием специальных теплообменников и промежуточных теплоносителей	нет информации	77,5	3244

Несмотря на значительное количество научно-исследовательских работ [42, 50, 82, 116 и др.], 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.

1.4 Обзор сушилок, реализующих повторное использование отработавшего агента сушки и работ, направленных на теоретический анализ эффективности повторного использования агента сушки

Устройства для повторного использования отработавшего агента сушки получают распространение и все чаще внедряются в производство. Применение таких систем, как частичная утилизация теплоты отработавшего сушильного агента, может значительно улучшить энергоэффективность процесса сушки не только зерновых культур, но и семян трав.

Перевод зерносушилок на работу с рециркуляцией отработавшего агента сушки является одним из эффективных подходов к снижению затрат тепловой энергии на единицу удаляемой влаги.

Систематизация основных решений по рациональному использованию отработавшего агента сушки приведена на рисунке 1.4 [19].



Рисунок 1.4 – Варианты рециркуляции отработавшего агента сушки

Частичная утилизация теплоты отработавшего сушильного агента нашла применение в сушилках отечественного производства таких как «Целинная – 30», А1–УЗМ–50 и др. Примером успешной реализации данного подхода является сушильный агрегат С–30 от ЗАО «Агропромтехника» г. Киров. При использовании системы рециркуляции отработавшего сушильного агента и герметизации сушиллки снижается расход топлива на 30% по сравнению с аналогами [120].

Интересным вариантом является колонковая сушилка фирмы "Картер-Дей". В данной сушилке агент сушки проходит последовательно через три секции шахты – в начале процесса в нижней секции шахты с максимально возможной температурой происходит удаление влаги из материала, затем агент отсасывается и возвращается обратно к наиболее сырой массе для подсушки. Однако, стоит отметить, что в описанной схеме сушки используется лишь частичная рециркуляция агента, поскольку часть отработанного агента, после прохождения через все три секции шахты, выбрасывается в атмосферу [123].

В шахтных сушилках шведской фирмы "Свенска Флактфабрикен" процесс рециркуляции осуществляется следующим образом: наружный воздух протягивается вентилятором вначале через нижнюю охлаждающую камеру, затем, подогреваясь паровыми калориферами первой ступени, просушивает нижнюю сушильную камеру, несколько увлажнившись и потеряв температуру, теплоноситель снова подвергается подогреву в калориферах второй ступени и направляется на сушку в верхнюю сушильную камеру. Эта схема позволяет легко регулировать необходимую температуру агента сушки и поддерживать его влагопоглощительную способность [123]. Французская фирма «LAW» разработала зерносушилку с системой рекуперации тепла. Принцип работы основывается на том, что перед выбросом отработавшего агента сушки он проходит через теплообменник, где отдает часть своей теплоты гликолиевой воде, подогретая вода направляется в другой теплообменник, который находится по пути прохождения наружного воздуха, тем самым частично подогревается, энергозатраты снижаются [126].

Л.В. Колесов, Н.М. Андрианов, А.Г. Гуцинский, Н.В. Александров предлагают способ сушки зерна в сушильных установках шахтного типа, при котором

повторно использующийся отработавший агент сушки делится на два потока: первый – составляет 65...70%: из верхней части шахты и направляют на предварительный подогрев зерна. Второй – 35...30% от полного потока, отбирают из нижней части шахты, очищают в фильтре очистки, смешивают с наружным воздухом, подогревают в теплогенераторе и снова подают в шахту. Таким образом достигается использование теплоты всего отработавшего сушильного агента, повышается эффективность использования тепловой энергии на 10-15%, производительность процесса сушки повышается на 25...30% [80].

В аэрожелобной зерносушилке СЗША–4 отработавший агент сушки через окна в стенках шахты поступает в систему рециркуляции, где очищается от легких примесей в циклоне и подается для повторного подогрева в теплогенератор через клапан-смеситель. Контроль за кратностью использования осуществляется по его относительной влажности и температуре на выходе из сушильной. Снижение удельных энергозатрат на испарение влаги и привод вентилятора при данном способе достигает 18 – 20%, автоматизация обеспечивает дополнительное снижение энергозатрат на 3 – 5% [19].

Известные и применяемые на практике конструкции систем повторного использования агента сушки состоят как правило из воздуховодов, циклонов для очистки воздуха, трёхходовых клапанов – смесителей, теплообменных аппаратов. Разработка и описание автоматических систем регулирования их работы в литературе не приводятся.

М.С. Волхоновым в работе [17] приводятся данные теоретического исследования эффективности повторного использования агента сушки без подмешивания свежего воздуха. Автор утверждает, что значительной экономии энергии на сушку – до 27,9% возможно добиться при двух-четырёхкратном повторном использовании сушильного агента. Экономичность сушки и эффективность повторного использования воздуха улучшается с увеличением температуры агента сушки и может достигать 52,2% (рисунок 1.5).

При увеличении расхода воздуха на сушку для температур его нагрева от 80 °С и выше удельные энергозатраты на сушку незначительно увеличиваются – на

0,2...0,4 МДж/(кг.исп.вл), и наоборот, значительно возрастают с ростом потребного давления с 0,5 до 3 кПа от 0,7 до 1,9 МДж/(кг.исп.вл). Контроль за кратностью использования сушильного агента следует осуществлять по относительной влажности агента сушки и его температуре на выходе из сушильной камеры с использованием H-d диаграммы тепловлажностного состояния воздуха [17].

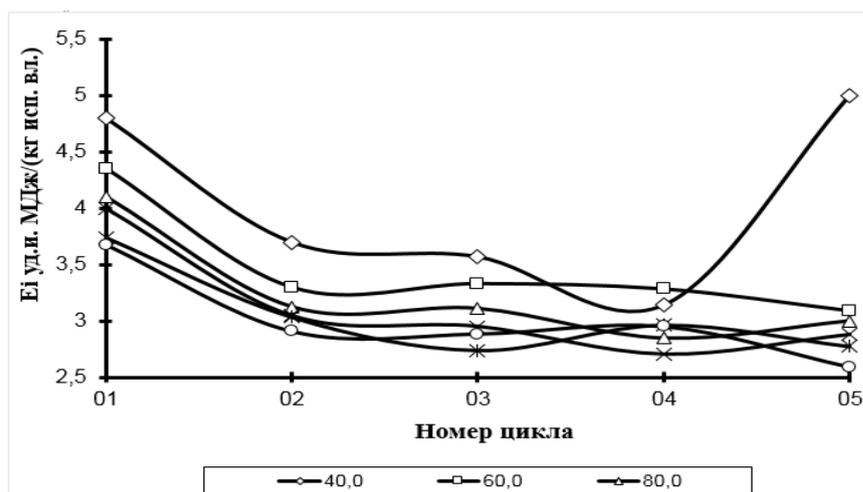


Рисунок 1.5 – Графические зависимости между расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента при различной температуре его нагрева

В другой работе [15] по обоснованию эффективности рециркуляционного агента сушки авторы М.С. Волхонов и И.С. Зырин утверждают, что наибольшая эффективность рециркуляции агента сушки может быть достигнута применением автоматического управления процессом рециркуляции и определяется коэффициентом рециркуляции, зависящим от параметров атмосферного воздуха, отработавшего агента сушки и температуры материала в начале сушки.

Теплотехническую эффективность рециркуляции авторы предлагают рассчитывать по зависимости 1.1:

$$e_N = \left(\frac{N_2}{N_0} - 1 \right) 100\%, \quad (1.1)$$

где N_0 – тепловая мощность нагрева атмосферного воздуха до необходимой температуры, кВт;

N_2 – тепловая мощность нагрева отработавшего агента сушки до необходимой температуры, кВт.

Физическая величина e_N показывает, на сколько процентов тепловая мощность нагрева отработавшего агента сушки меньше тепловой мощности нагрева атмосферного воздуха. Если эта величина положительна, то рециркуляция агента сушки эффективна, а если отрицательна – то неэффективна с энергетической точки зрения [15].

Коэффициент рециркуляции рассчитывается по формуле:

$$k_p = \frac{d_1 - d_0}{d_2 - d_0}, \quad (1.2)$$

где d_1 – максимально допустимое влагосодержание агента сушки, г/кг;

d_2 – влагосодержание агента сушки направляемого на рециркуляцию, г/кг;

d_0 – влагосодержание атмосферного воздуха, г/кг.

Выбор коэффициента рециркуляции можно осуществлять по таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Выбор коэффициента рециркуляции

Условие		Значение k_p
$e_N < 0$		0
$e_N > 0$	$d_2 > d_1$	$(d_1 - d_0)/(d_2 - d_0)$
	$d_2 < d_1$	1

Эффективность рециркуляции определяет показатель e_p – теплотехническую эффективность рециркуляции, но действие этого показателя ограничивает условие конденсации влаги $d_2 > d_1$, при выполнении которого целесообразна частичная рециркуляция [15]. Поэтому необходимо изучить как влияют рабочие режимные па-

раметры тепловентиляционной системы сушилки с частичным подмешиванием атмосферного воздуха при рециркуляции сушильного агента на конденсацию влаги в сушильной камере.

1.5 Выводы по разделу, цель и задачи научного исследования

1. В имеющейся литературе, при рассмотрении авторами вопроса снижения энергоемкости процесса сушки зерна путем рециркуляции теплоты отработавшего агента сушки, отсутствует информация о пределах возможного использования теплоты отработавшего агента сушки с различным влагосодержанием при подмешивании к нему свежего воздуха.

2. В нечерноземной зоне России наиболее широкое распространение получили зерновые сушилки бункерного типа. Однако бункерные сушилки обладают рядом недостатков – травмируют высоковлажное зерно шнеками, отмечается чрезмерная запыленность рабочей зоны при рециркуляции зерна.

3. В условиях импортозамещения аэродинамические устройства находят широкое применение при послеуборочной обработке зерна, бобовых, масличных культур и сыпучих семян трав для приёма и временного их хранения. Эти установки практически не травмируют зерно, простые в устройстве, обслуживании, универсальные.

4. В известных конструкциях аэродинамических сушилок агент сушки после прохождения через зерно выбрасывается в атмосферу, не отработав полностью свой тепловой потенциал. Таким сушилкам присуща проблема запыленности рабочей зоны и высокие удельные затраты на сушку – свыше 7,8 МДж/кг. исп.вл.

2 ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АГЕНТА СУШКИ

2.1 Обоснование критерия (показателя) оценки совершенства конструкции зерновых сушилок

«При выборе оборудования для сушки зерна определяющими факторами являются ее высокая производительность, экономичность, оптимальный расход топлива, долговечность, и, конечно, цена» [16]. Сельхозпроизводителям необходимо постоянно изучать рынок в поисках инновационных решений. Чем эти решения удачнее, тем быстрее окупаются затраты, тем качественнее продукт на выходе. В связи с предоставлением производителями оборудования для сушки зернового вороха не полного перечня характеристик возникают сложности с выбором зерносушилок.

«Для сравнительной оценки нами были рассчитаны технико-экономические показатели сушилок: удельная металлоёмкость, удельная стоимость, удельный расход теплоты в пересчете на плановые тонны в час в соответствии с ГОСТ. Формулы для расчета приведены в таблице 2.1. Расчеты проводились без приведения к нормальным условиям и без учета электроэнергии на привод рабочих органов» [16].

Таблица 2.1 – Формулы для расчета удельных технико-экономических показателей сушилок

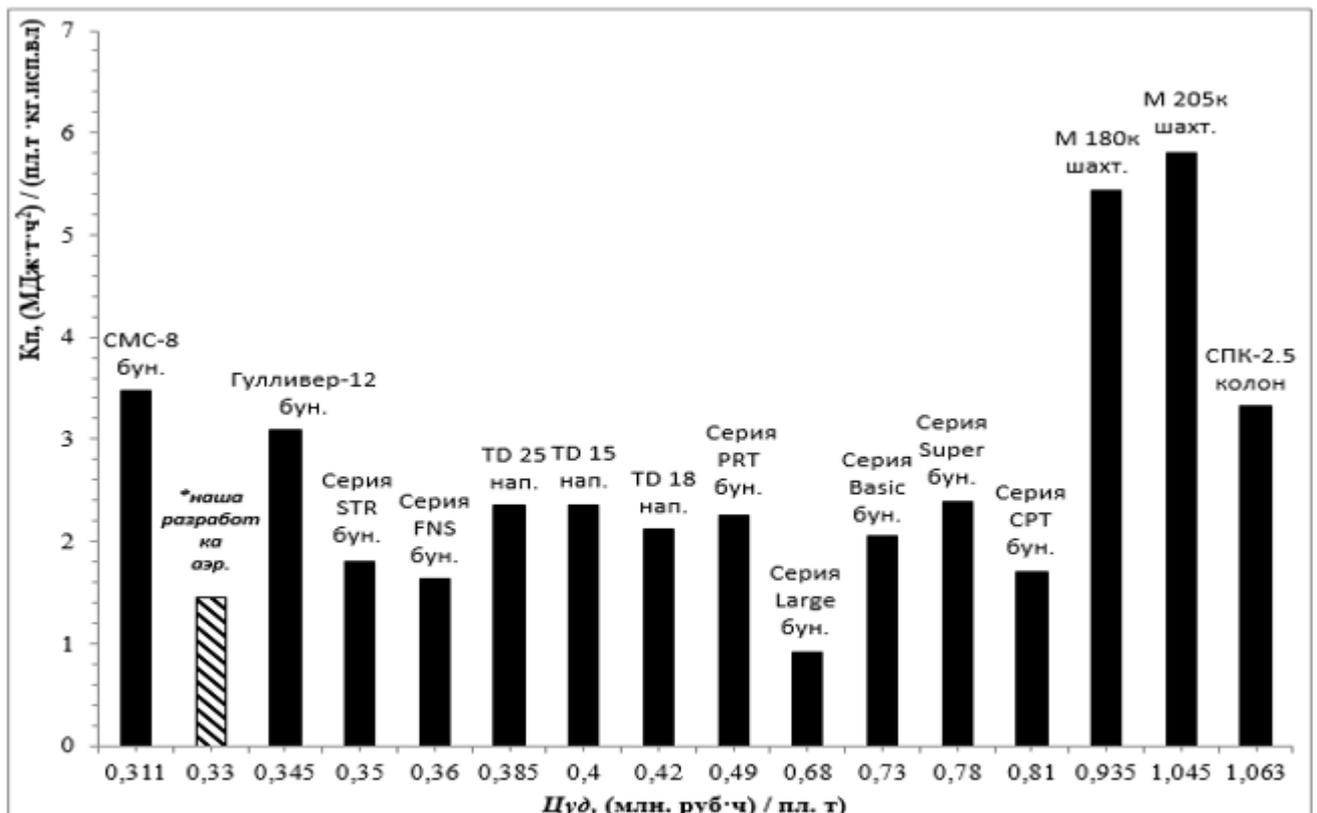
Характеристика	Формула	Входящие величины	Единица измерения
Удельная металлоёмкость	$M_{уд} = \frac{m}{A}, (2.1)$	m - масса сушилки, т; A - производительность, пл. т/ч	(т·ч)/ пл. т
Удельная стоимость	$C_{уд} = \frac{C}{A}, (2.2)$	C- стоимость зерносушилки, млн. руб.; A- производительность, пл. т/ч.	(млн.руб·ч.)/ пл. т
Удельный расход теплоты	$Q = \frac{B \cdot q}{W_{1-3}}, (2.3)$	B - количество условного топлива, кг; q - удельная теплота сгорания дизельного топлива, МДж/кг; W ₁₋₃ количество испаренной влаги, кг/ч.	(МДж·ч)/ кг.исп.вл.

«Проведенный анализ технико-экономических показателей зерносушилок убеждает в целесообразности поиска обобщенной характеристики, которая позволила бы упростить выбор сушилки по этим показателям. Предлагается ввести – «комплексный показатель совершенства конструкции сушилки», K_p , $(\text{МДж} \cdot \text{т} \cdot \text{ч}^2) / (\text{пл. т} \cdot \text{кг. исп. вл.})$ » [16]:

$$K_p = M_{уд} \cdot Q, \quad (2.4)$$

где $M_{уд}$ – удельная металлоёмкость, $(\text{т} \cdot \text{ч}) / \text{пл. т}$;
 Q – удельный расход теплоты, $(\text{МДж} \cdot \text{ч}) / \text{кг. исп. вл.}$.

Для наглядности и облегчения выбора зерновых сушилок предлагается использовать графическое представление данных показателей эффективности (рисунок 2.1).



бун. – бункерный тип сушилки; *нап.* – напольный тип сушилки; *колон.* – колонковый тип сушилки; *шахт.* – шахтный тип сушилки; *аэр.* – аэрожелобный тип сушилки. * – аэродинамическое устройство для сушки зерна.

Рисунок 2.1 – Графическое представление показателей эффективности зерновых сушилок

«Значения комплексного показателя совершенства конструкции зерновых сушилки и удельной стоимости сушилок являются разнопорядковыми элементами, которые необходимо одновременно учитывать при их покупке. Так, например, задавая один параметр, с помощью графика можно определить диапазон возможных решений по второму параметру» [16]. Результаты расчета технико-экономических показателей передвижных зерносушилок представлены в приложении Г.

2.2 Разработка конструкции и схемы работы аэродинамического устройства для сушки зерна

Нами разработано аэродинамическое устройство для приема, временного хранения, вентилирования и транспортирования сыпучих материалов [86]. Устройство конструктивно собирается по каркасно-тканевой технологии [85]. В устройстве, с целью повышения качества вентилирования, подсушки и сушки зернового вороха, снижения энергоемкости процесса, запыленности рабочей зоны, установлена система рециркуляции отработавшего агента сушки.

«Устройство (рисунок 2.2, 2.3) содержит аэрожелоб, разделенный грузонесущей перфорированной перегородкой на воздухоподводящую и транспортирующую части, представляющий собой каркас, обтянутый тканью. Внешние стенки аэрожелоба и центральный воздухораспределительный канал изготовлены из воздухонепроницаемой и водоотталкивающей ткани, а внутренние боковые стенки из ткани для сит. Система рециркуляции отработавшего агента сушки состоит из сдвижного зонта с загрузочным отверстием, пылеулавливающего устройства, клапана смесителя, а также вентилятора аспиратора, обеспечивающего режим аспирации» [86].

«Аэродинамическое устройство для сушки зерна включает в себя топочный блок 4, вентилятор 1 (рисунок 2.2, 2.3), соединенный с камерой сушки посредством распределяющего воздухоподводящего патрубка 2, сдвижной зонт 6 с загрузочным

отверстием 11. Сдвижной зонт выполнен из металлического каркаса состоящий из вертикально изогнутых звеньев 9 обтянутых тканью. Наличие отверстия 10 в крайнем изогнутом звене позволяет присоединить вплотную к сдвижному зонту пылеулавливающее устройство 5, соединенное с вентилятором аспиратором 8, который в свою очередь соединяется с клапаном смесителем 3» [86].

«Устройство работает следующим образом: в случае отсутствия загрузочной норрии сдвижной зонт 6 сдвигается в сторону пылеулавливающего устройства 5, зерно загружается сверху в аэродинамическое устройство для сушки зерна на грузонесущую перфорированную перегородку 18, затем зонт сдвигается в исходное положение; в случае наличия загрузочной норрии зерно загружается через загрузочное отверстие 11, затем закрывается герметично. Включается вентилятор 1, при этом агент сушки, проходящий через зерно, нагревает его, насыщается испарённой влагой, проходит через надсушильное пространство, созданное сдвижным зонтом 6, пылеулавливающее устройство 5, вентилятором аспиратором 8 направляется в клапан смеситель 3. В зависимости от положения поворотной заслонки 15, «в режиме рециркуляции» (рисунок 2.4), отработавший агент сушки может быть полностью или частично направлен на повторное использование, либо полностью направлен в атмосферу через патрубок 12 «режим смены теплоносителя» (рисунок 2.5). В режиме «смешивание» (рисунок 2.6) смесь частично отработавшего агента сушки и наружного воздуха вентилятором 1 (рисунок 2.2) подается в теплогенератор 4 и далее в аэродинамическое устройство для сушки зерна 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 поворотного клапана 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 16 (рисунок 2.3) выпускного лотка 17, подача воздуха осуществляется только под грузонесущую перегородку 18» [86].

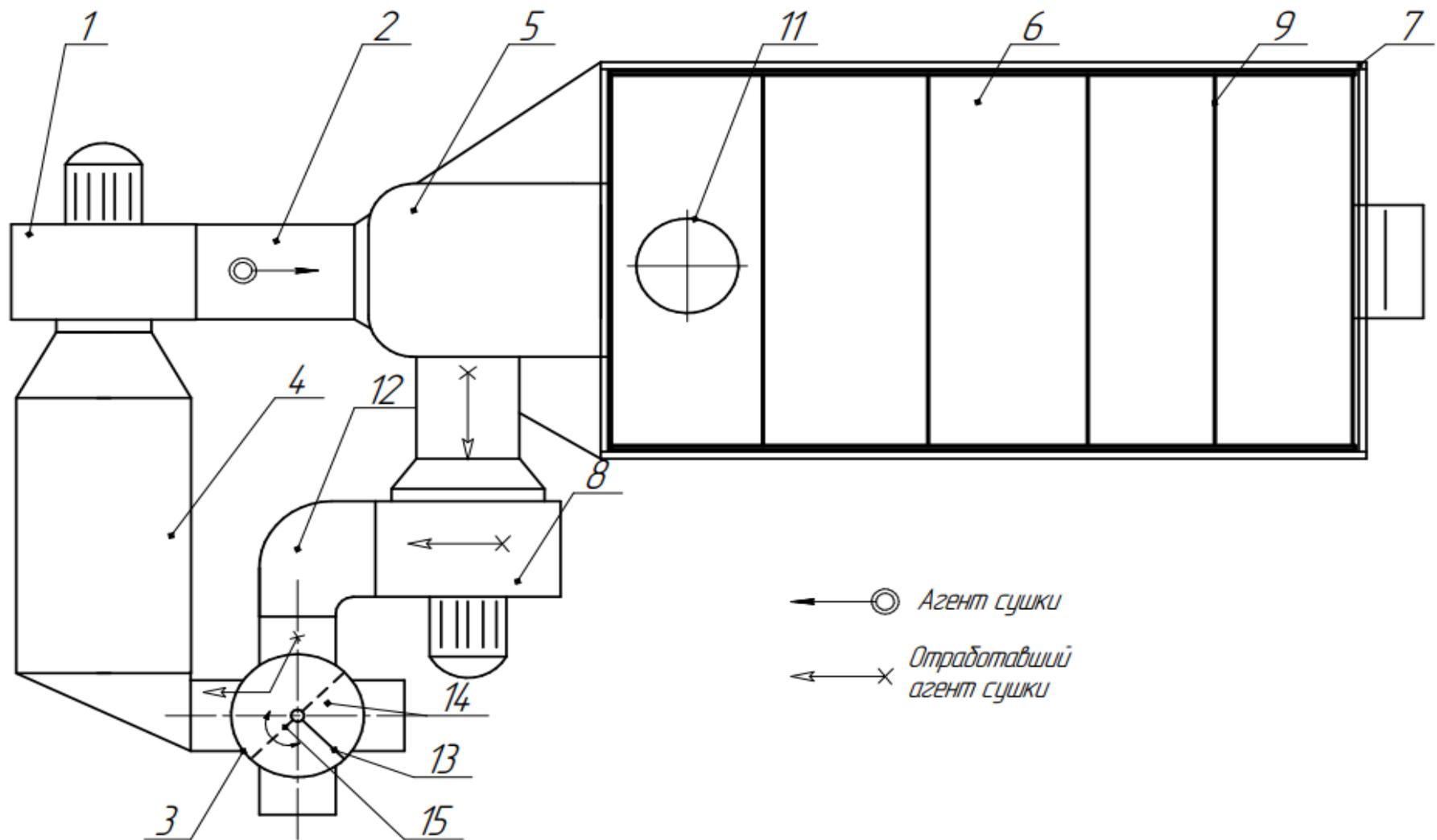


Рисунок 2.2 – Общий вид аэродинамического устройства для сушки зерна

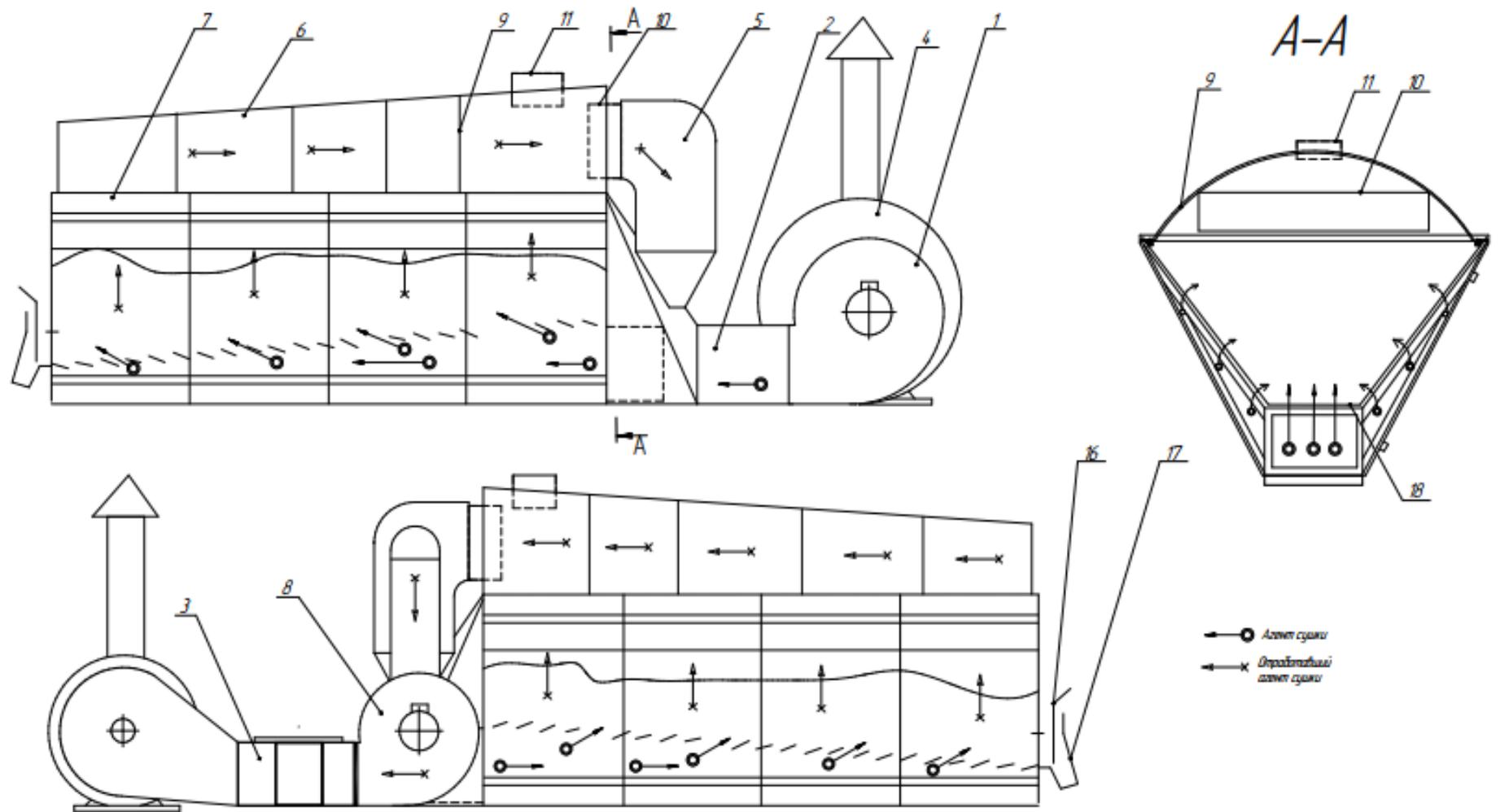


Рисунок 2.3 – Дополнительные виды аэродинамического устройства для сушки зерна

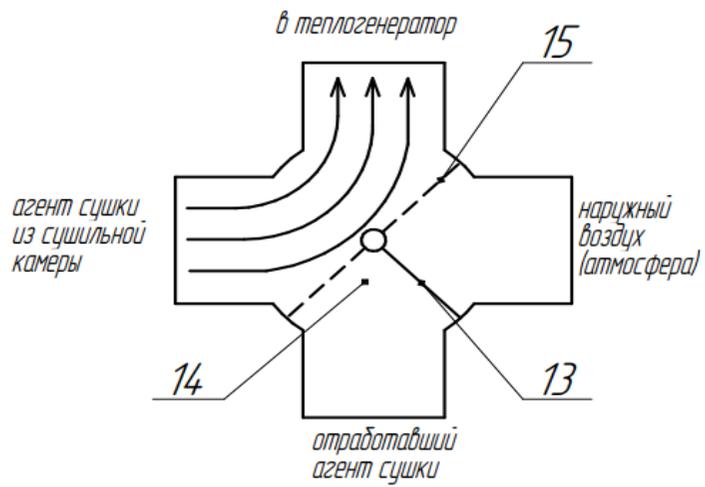


Рисунок 2.4 – Клапан-смеситель в режиме рециркуляции

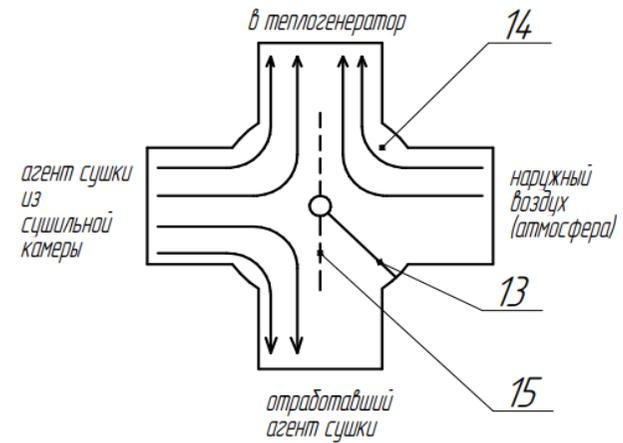


Рисунок 2.5 – Клапан-смеситель в режиме смешивания отработавшего агента сушки

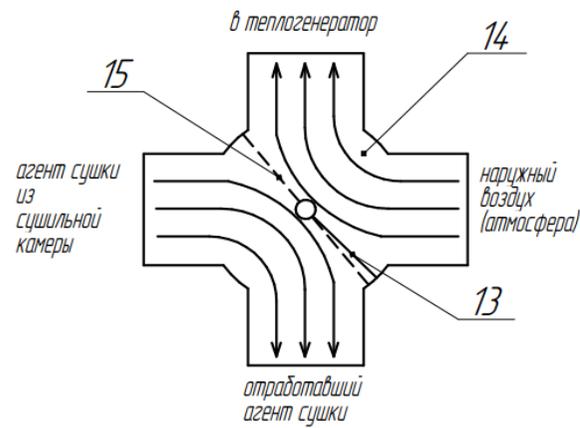


Рисунок 2.6 – Клапан-смеситель в режиме смены теплоносителя

«Конструкция аэродинамического устройства для сушки зерна за счет применения системы рециркуляции отработавшего агента сушки обеспечивает значительное снижение энергоемкости процесса, снижение запыленности рабочей зоны. Применение вентилятора аспиратора обеспечивает снижение потерь подогретого воздуха через неплотности сушильной камеры, надежное смещение материала вдоль грузонесущей перегородки при его разгрузке, надежное удаление легких примесей, пыли» [86].

2.3 Теоретическое обоснование теплотехнической эффективности рециркуляции агента сушки при постоянном подмешивании свежего воздуха и рациональных режимных параметров работы аэродинамического устройства для сушки зерна

Научные результаты этого раздела отражены в статье [22]. Графическое моделирование подмешивания свежего воздуха при повторном использовании сушильного агента проведем на основе диаграммы тепловлажностного состояния воздуха, разработанной профессором Л.К. Рамзиным. Сделаем следующие допущения – агент сушки увлажняется до 70%, потери в окружающую среду отсутствуют – теоретический процесс. Схемы режимов работы тепловентиляционной системы приведены на рисунках 2.7, 2.8, 2.9, исходные данные для расчета в таблице 1.

Для рисунков 2.7, 2.8, 2.9 примем условные обозначения:

t_0, t_1, t_2 – соответственно температура наружного воздуха, агента сушки после нагрева в теплогенераторе, агента сушки после пропуска через зерно, °С;

$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$ – соответственно относительная влажность наружного воздуха, агента сушки после подогрева в теплогенераторе, агента сушки после пропуска через зерно в режиме полной смены агента сушки, агента сушки при рецир-

куляции без подмешивания наружного воздуха после пропуски через теплогенератор, агента сушки после второго пропуски через зерно, агента сушки при подмешивании наружного воздуха и нагреве в теплогенераторе, агента сушки после третьего пропуски через зерно %;

d_0, d_1, d_2, d_3 – соответственно влагосодержание наружного воздуха, влагосодержание после подогрева в теплогенераторе, агента сушки после первого пропуски через зерно в режиме полной смены агента, агента сушки при рециркуляции без помешивания наружного воздуха после пропуски через теплогенератор, г/кг с.в.;

$H_0, H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$ – соответственно энтальпия наружного воздуха, агента сушки после подогрева в теплогенераторе, агента сушки после первого пропуски через зерно в режиме полной смены агента сушки, агента сушки при рециркуляции без подмешивания наружного воздуха после пропуски через теплогенератор, агента сушки после второго пропуски через зерно, агента сушки при подмешивании наружного воздуха и нагреве в теплогенераторе, агента сушки после третьего пропуски через зерно, кДж/кг;

ω_k, τ_k – соответственно влажность, % и температура зерна, °С.

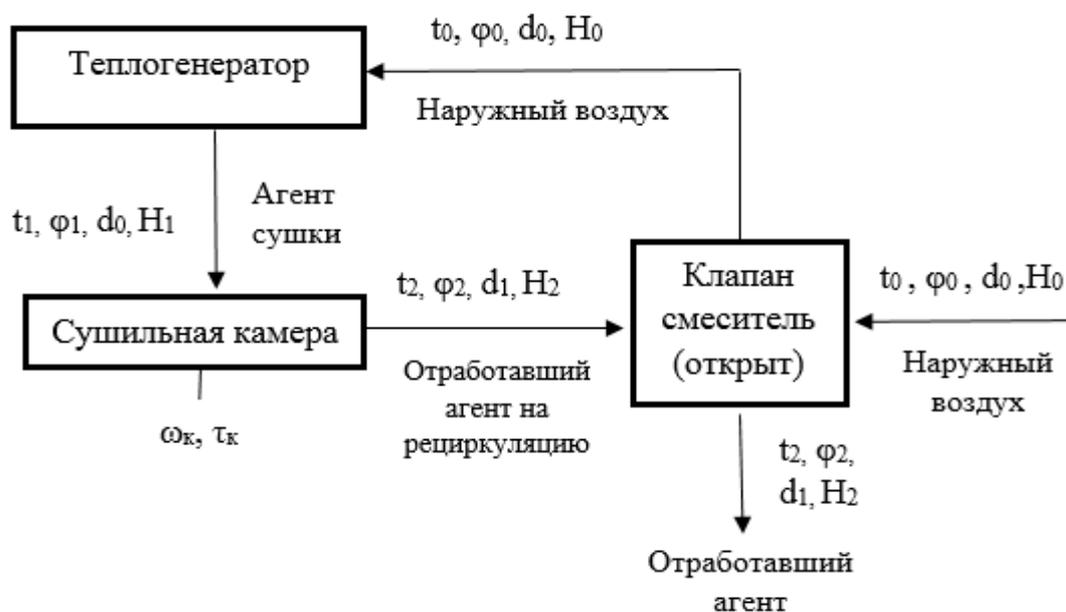


Рисунок 2.7 – Схема работы тепловентиляционной системы при полной смене сушильного агента

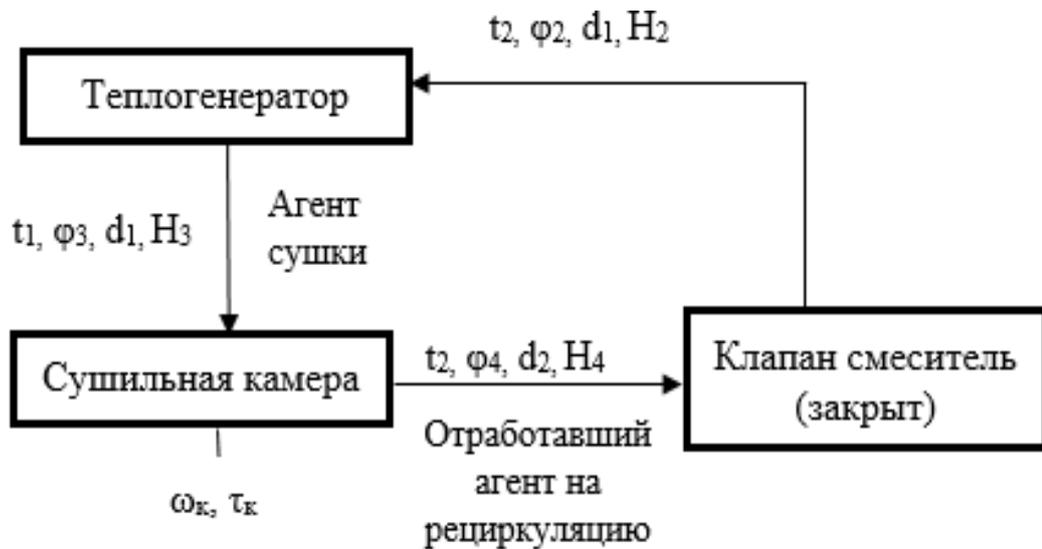


Рисунок 2.8. – Схема работы тепловентиляционной системы при рециркуляции сушильного агента

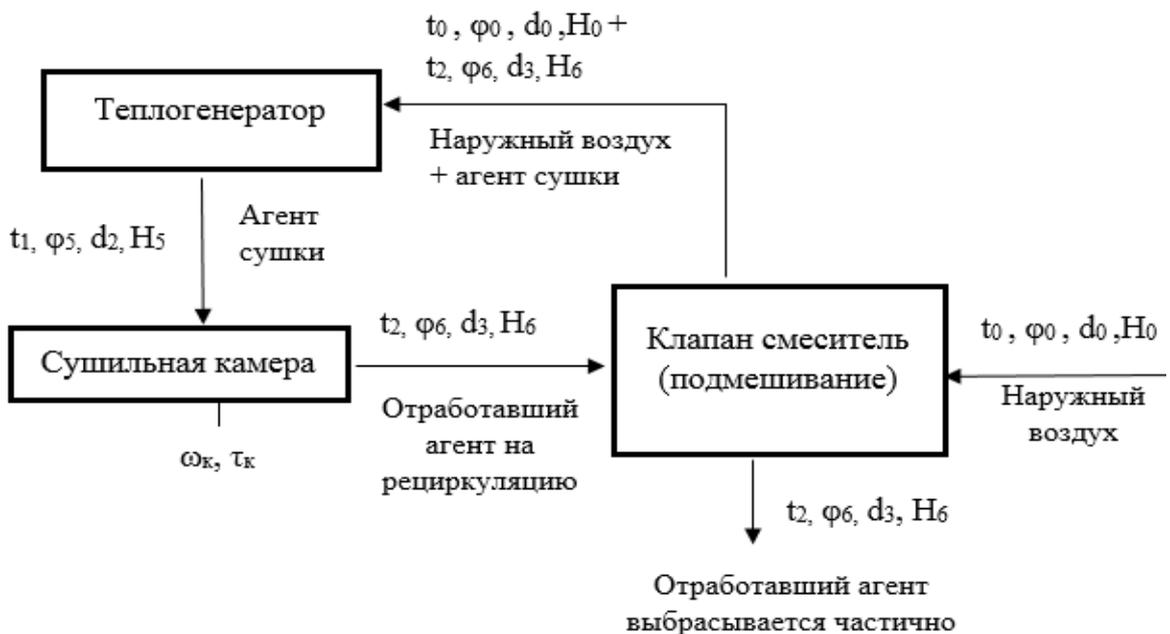


Рисунок 2.9 – Схема работы тепловентиляционной системы при рециркуляции сушильного агента с подмешиванием наружного воздуха

На H-d диаграмме смоделировали по пять циклов повторного использования теплоты отработанного 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 4). Были

сделаны следующие допущения: агент сушки увлажняется до 70 %; потери в окружающую среду отсутствуют – теоретический процесс. Исходные данные для расчета указаны в таблице 2.2.

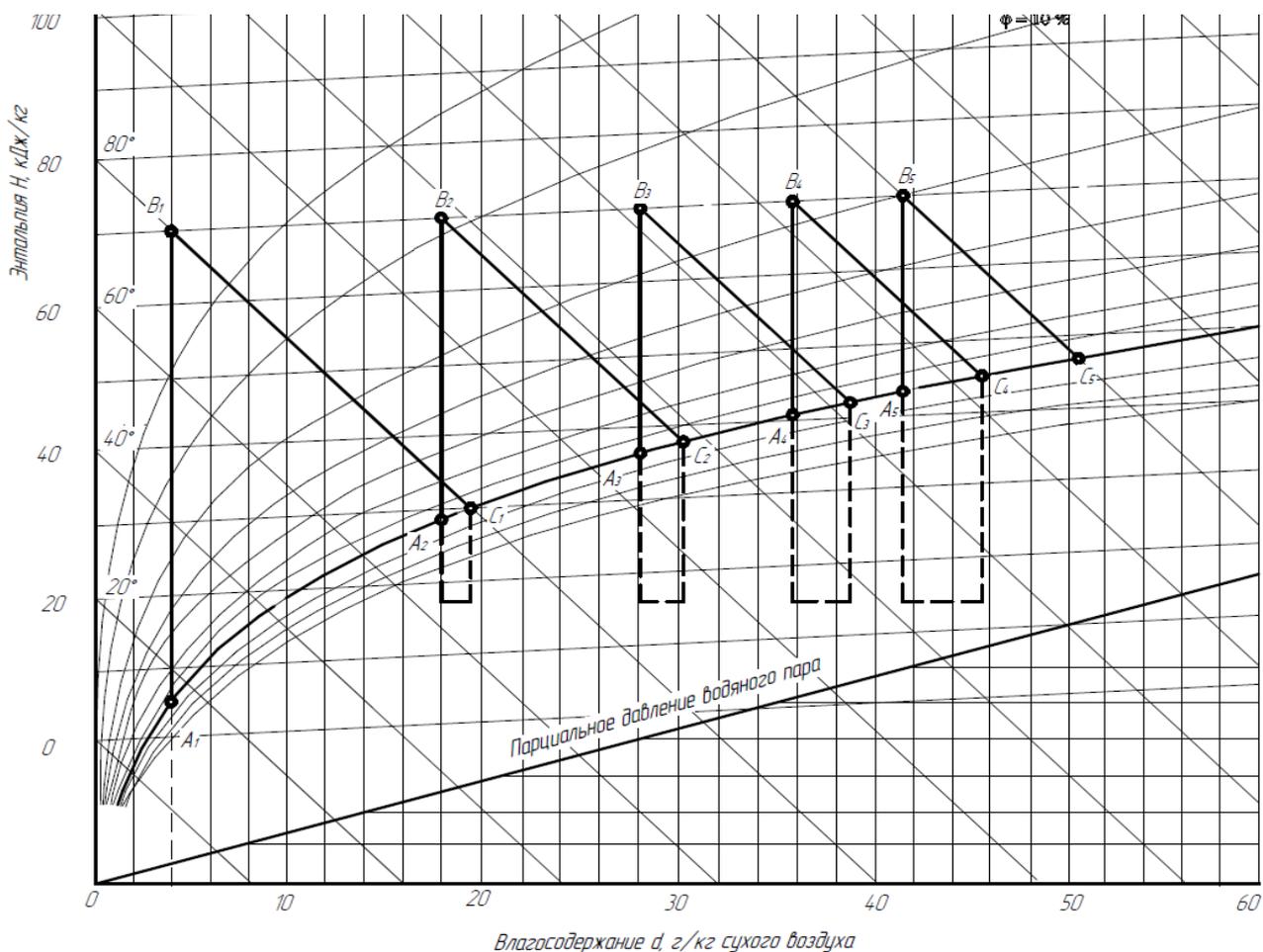
Таблица 2.2 – Исходные данные для моделирования

Наименование	Величина	Источник информации
Тип сушилки	-	Аэрожелобная
Назначение зерна	-	Продовольственное
Производительность по сырому зерну, G_1 , кг/ч	1000	Принято условно
Время сушки, т, ч.	1	Рекомендации
Влажность сырого зерна, w_1 , %	20	Статистика
Влажность зерна на выходе из сушильной камеры, w_2 , %	14	Рекомендации
Температура окружающего воздуха, t_0 , °C	5	ГОСТ Р 55262-2012
Температура агента сушки, t_1 , °C	40, 70, 100	Принято условно
Относительная влажность наружного воздуха, φ_0 , %	70	Метеоданные
Относительная влажность отработавшего агента сушки, φ_2 , %	70	Рекомендации

По H-d диаграмме определяли 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 $t_1 = 70$ °C, при $d = const$; точка B_1 : $d_1 = 4$ г/кг с.в; $H_1 = 81,22$ кДж/кг с.в. Сушка – испарение в теоретическом процессе происходит до $\varphi_2 = 70$ %, при $H = const$. Выходные параметры, точка C_1 : $d_2 = 19,64$ г/кг с.в; $H_2 = 81,22$ кДж/кг с.в.



Точки $A_2 - A_5$ - начальные параметры цикла при постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

Рисунок 2.10 – Модель работы тепловентиляционной системы в режиме рециркуляции агента сушки при подмешивании 10 % свежего воздуха

Второй цикл повторного использования теплоты отработавшего агента с подмешиванием свежего воздуха

Значения точки A_2 : начальные d_3 и H_3 смеси определяли по следующим известным зависимостям [103]:

$$d_3 = \frac{G_{c1} \cdot d_1 + G_{c2} \cdot d_2}{G_{c1} + G_{c2}}, \quad (2.5)$$

где G_c – количество сухого воздуха, кг.

$$H_3 = \frac{G_{c1} \cdot H_1 + G_{c2} \cdot H_2}{G_{c1} + G_{c2}}, \quad (2.6)$$

Исходя из известных значений влагосодержания и энтальпии, вместо количества сухого воздуха использовали его процентное соотношение.

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

По аналогии рассчитали остальные три цикла для нагрева агента сушки до 70 °С.

Также по аналогии смоделировали по пять циклов нагрева агента сушки до 70 °С с подмешиванием 20...40 % свежего воздуха и 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 ГОСТ Р 55262-2012 определяли зависимости влияния циклов использования сушильного агента на расход энергии на испарение влаги из зерна, удельный массовый расход воздуха на сушку зерна, суммарные энергозатраты на испарение влаги и привод вентилятора при температуре нагрева агента сушки до 40, 70, 100 °С с подмешиванием 10 – 40% свежего воздуха.

Для каждого цикла (i) определяли количество испаряемой влаги из сушильной камеры по известной зависимости:

$$W_{ck} = \frac{\omega_{i1} - \omega_{i2}}{100 - \omega_{i2}} \cdot W_1, \quad (2.7)$$

Удельные энергозатраты $E_{i_{уд.и}}$, МДж/кг. исп.вл. на испарение кг влаги из зерна определяли по зависимости:

$$E_{i_{уд.и}} = \frac{H_{i_2} - H_{i_0}}{d_{i_2} - d_{i_0}}, \quad (2.8)$$

Необходимый удельный массовый расход $q_{i_{уд.м}}$, кг/кг.исп.вл. сушильного агента по циклам при различной температуре его нагрева рассчитывали по зависимости:

$$q_{i_{уд.м}} = \frac{1000}{d_{i_2} - d_{i_0}}, \quad (2.9)$$

Удельные энергозатраты на привод вентилятора $E_{i_{уд.в}}$, МДж/кг.исп.вл. в каждом цикле вычисляли по зависимости:

$$E_{i_{уд.в}} = \frac{N_{i_в} \cdot k_э}{1000 \cdot W_{с.к.}}, \quad (2.10)$$

где $N_{i_в}$ - мощность, требуемая на привод вентилятора в i -ом цикле, кВт;

$k_э$ - коэффициент тепловой эквивалентности, учитывающий затраты на производство и транспортировку электроэнергии к потребителю, кДж/(кВт·ч). Согласно ГОСТ Р 55262-2012 [84] - $k_э=10137$ кДж/(кВт·ч).

$$N_{i_в} = \frac{P \cdot Q_{i_м} \cdot v_{i_о}}{3600 \cdot \eta_в}, \quad (2.11)$$

где P – потребное давление, Па, принимаем $P=1000$ Па;

$v_{i_о}$ - объем влажного воздуха на 1 кг сухого воздуха в i -ом цикле, м³/кг;

$\eta_в$ - КПД вентилятора, принимаем $\eta_в=0,47$.

Общий массовый расход сухого воздуха по циклам $Q_{им}$, кг/ч, определяли по зависимости:

$$Q_{им} = \frac{1000}{d_{i_2} - d_{i_0}} \cdot W_{ск}. \quad (2.12)$$

Интегральный расход энергии на испарение влаги $E_{iyд}$, МДж/кг.исп.вл., определяли по формуле:

$$E_{iyд} = E_{iyд.и} + E_{iyд.с}, \quad (2.13)$$

Графические зависимости влияния циклов использования сушильного агента на расход энергии на испарение влаги из зерна, удельный массовый расход воздуха на сушку зерна, суммарные энергозатраты на испарение влаги и привод вентилятора для температуры нагрева агента сушки до 70 °С, построенные по результатам теоретического исследования приведены на рисунках 2.11 – 2.14.

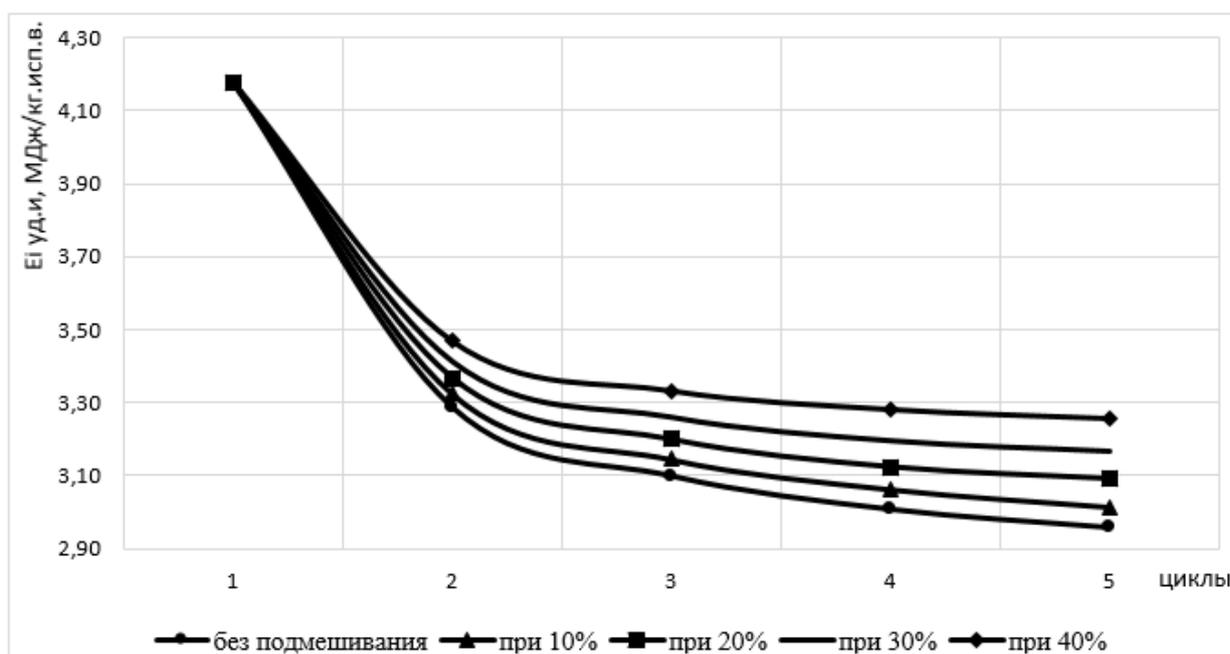


Рисунок 2.11 – Энергозатраты на испарение влаги при рециркуляции сушильного агента, нагретого до 70°С с подмешиванием свежего воздуха

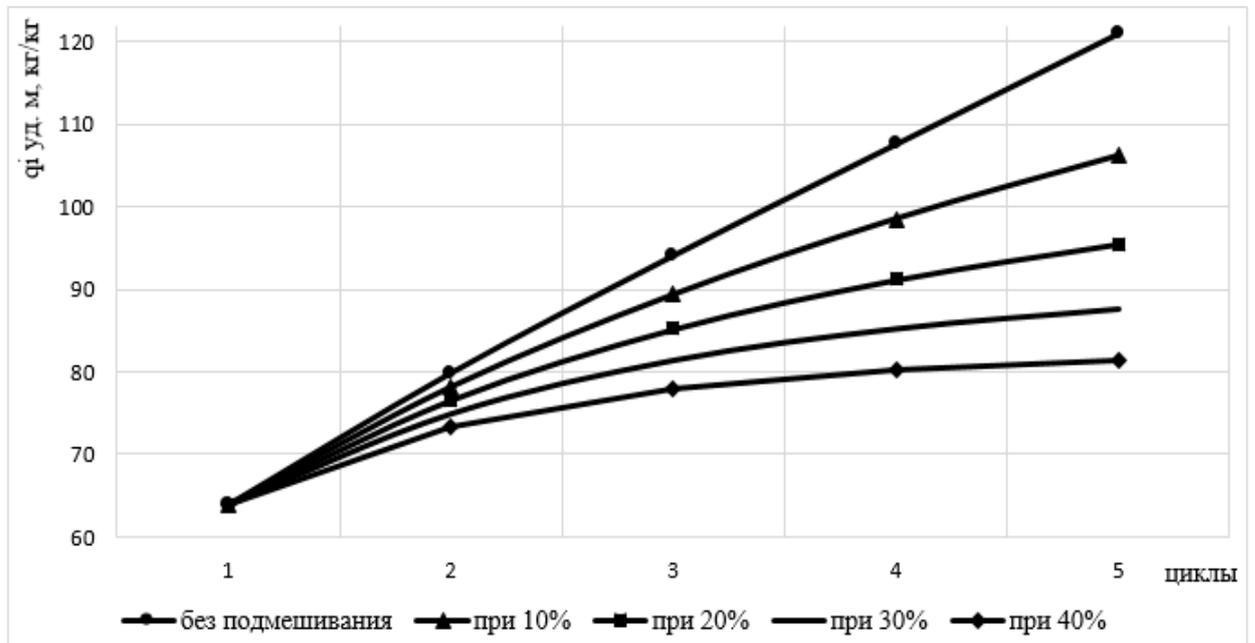


Рисунок 2.12 – Удельный массовый расход воздуха при рециркуляции сушильного агента, нагретого до 70°C с подмешиванием свежего воздуха

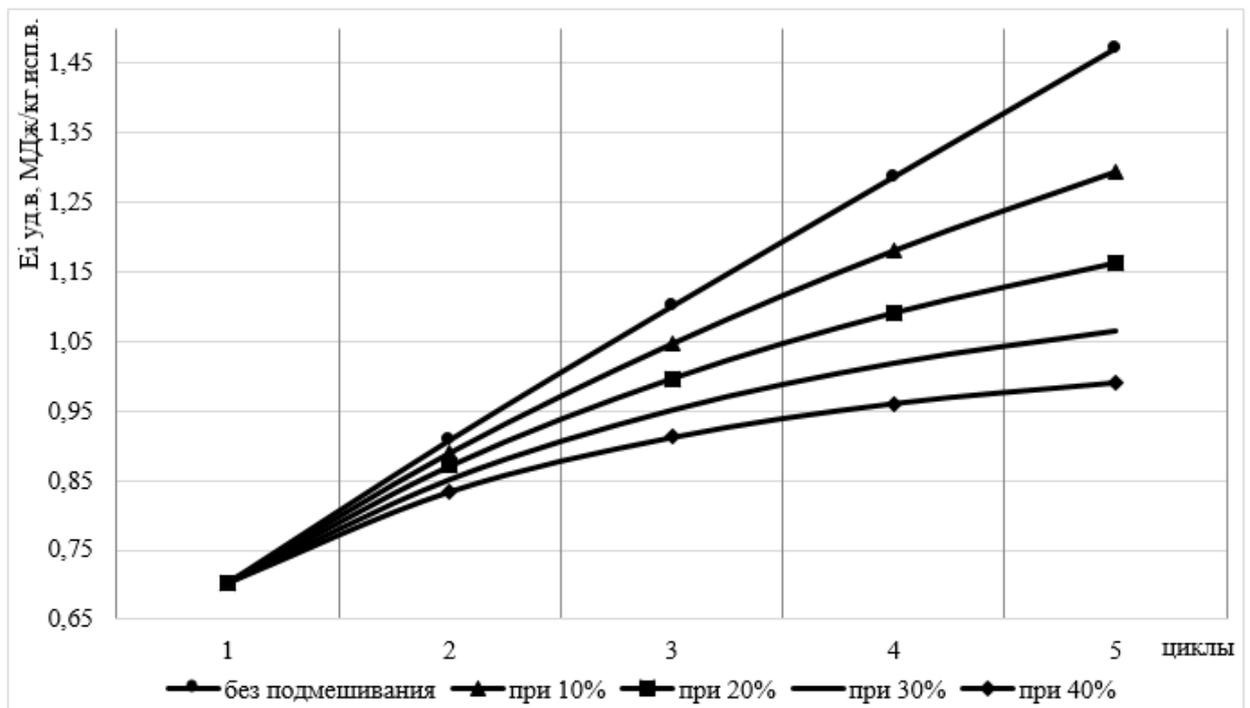


Рисунок 2.13 – Удельные энергозатраты на привод вентилятора при рециркуляции сушильного агента нагретого до 70°C с подмешиванием свежего воздуха

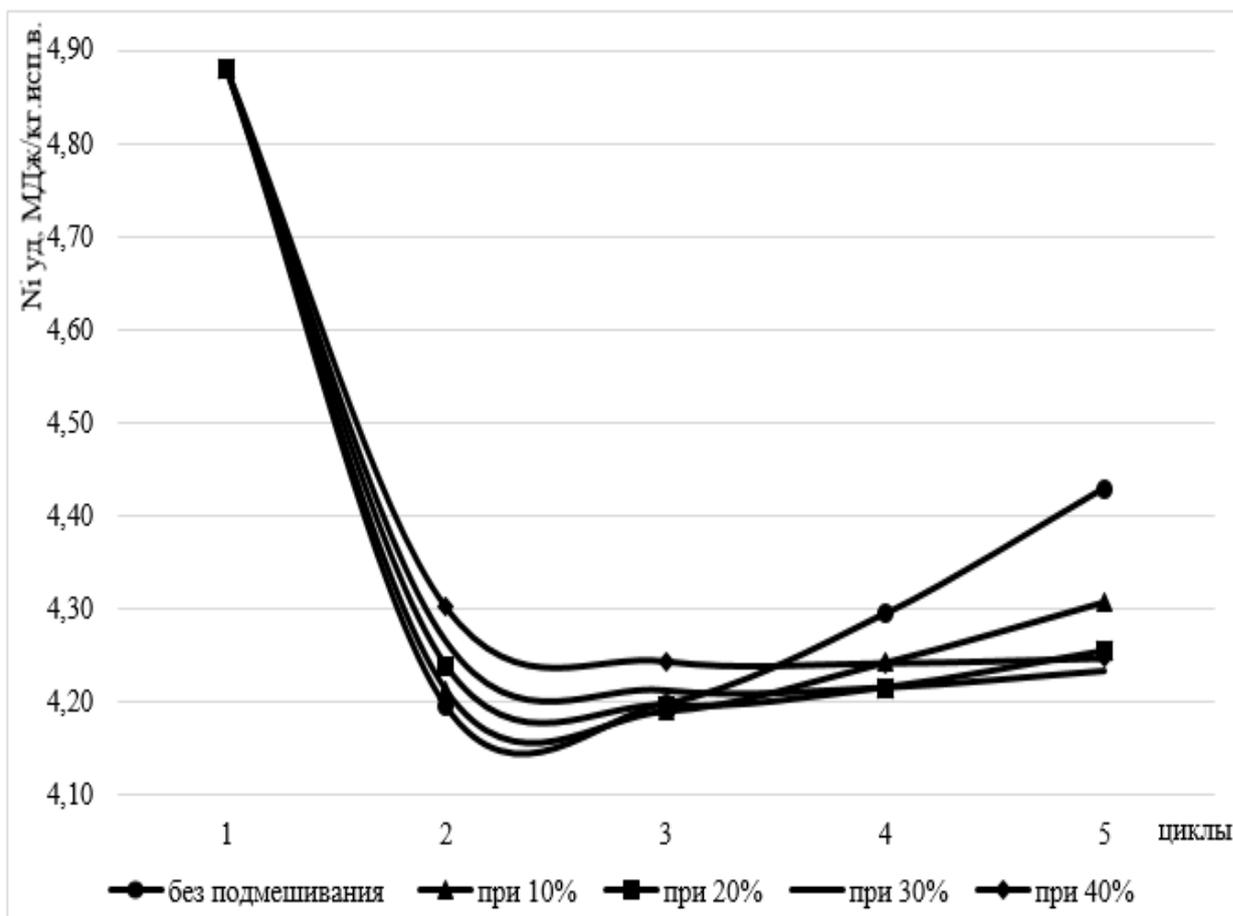


Рисунок 2.14 – Интегральный расход энергии при рециркуляции сушильного агента, нагретого до 70°C с подмешиванием свежего воздуха

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 $40, 70, 100^{\circ}\text{C}$ приведены соответственно на рисунках 2.15 – 2.17. Получение контрольных параметров необходимо для удержания тепловентиляционной системы в рациональном режиме и при ее автоматизации.

Для рисунков 2.15 – 2.17 примем условные обозначения: $t_{a.c.}$, t_u , t_p – соответственно температура агента сушки, в конце цикла сушки, точки росы, $^{\circ}\text{C}$; φ , Эк – соответственно относительная влажность воздуха и экономия энергозатрат, %.

Показатели на входе в сушилку при 2-3 цикле сушки		Показатели на выходе из системы при 2-3 цикле сушки и температуре агента 40 °С	
$t_{a.c.} = 40\text{ °С}$		без подмешивания	
без подмешивания $\varphi = 24,6-35,15\%$		$t_d = 27,66 - 31,06\text{ °С}$	$t_p = 21,69 - 24,94\text{ °С}$
10% подмешивания $\varphi = 23,02-31,58\%$		$\varphi = 70\%$	$\text{Эк} = 2,72 - (-8,02)\%$
20% подмешивания $\varphi = 21,46-28,2\%$		10% подмешивание	20% подмешивание
30% подмешивания $\varphi = 19,88-25,04\%$		$t_d = 27,12 - 29,65\text{ °С}$	$t_d = 26,57 - 28,57\text{ °С}$
40% подмешивания $\varphi = 18,31-22,08\%$		$t_p = 21,18 - 23,88\text{ °С}$	$t_p = 20,65 - 22,85\text{ °С}$
		$\varphi = 70\%$	$\varphi = 70\%$
		$\text{Эк} = 4,49 - (-3,85)\%$	$\text{Эк} = 3,85 - (-0,64)\%$
		30% подмешивание	40% подмешивание
		$t_d = 26 - 27,81\text{ °С}$	$t_d = 25,43 - 26,79\text{ °С}$
		$t_p = 20,11 - 21,84\text{ °С}$	$t_p = 19,56 - 20,86\text{ °С}$
		$\varphi = 70\%$	$\varphi = 70\%$
		$\text{Эк} = 4,33 - 1,44\%$	$\text{Эк} = 4,17 - 2,89\%$

Рисунок 2.15 – Рациональные контрольные значения параметров отработавшего агента сушки, нагретого до 40 °С с подмешиванием свежего воздуха

Показатели на входе в сушилку при 2-3 цикле сушки		Показатели на выходе из сушилки при 2-3 цикле сушки и температуре агента 70 °С	
$t_{a.c.} = 70\text{ °С}$		без подмешивания	
без подмешивания $\varphi = 9,94 - 15,97\%$		$t_d = 36,7 - 44,44\text{ °С}$	$t_d = 38,59 - 42,93\text{ °С}$
10% подмешивания $\varphi = 9,17 - 14,08\%$		$t_p = 32,81 - 37,7\text{ °С}$	$t_p = 32,12 - 36,26\text{ °С}$
10% подмешивания $\varphi = 9,17 - 14,08\%$		$\varphi = 70\%$	$\varphi = 70\%$
20% подмешивания $\varphi = 8,4 - 12,29\%$		$\text{Эк} = 13,93\%$	$\text{Эк} = 13,73 - 14,14\%$
Показатели на входе в сушилку при 3-4 цикле сушки		Показатели на выходе из системы при 3-4 цикле сушки и температуре агента 70 °С	
20% подмешивания $\varphi = 8,4 - 12,29\%$		20% подмешивание	
30% подмешивания $\varphi = 7,62 - 10,61\%$		$t_d = 41,42 - 43,54\text{ °С}$	$t_p = 34,83 - 36,84\text{ °С}$
40% подмешивания $\varphi = 6,84 - 9,04\%$		$\varphi = 70\%$	$\text{Эк} = 13,93 - 13,52\%$
		30% подмешивание	40% подмешивание
		$t_d = 39,93 - 41,45\text{ °С}$	$t_d = 38,46 - 39,47\text{ °С}$
		$t_p = 33,41 - 34,85\text{ °С}$	$t_p = 32 - 32,96\text{ °С}$
		$\varphi = 70\%$	$\varphi = 70\%$
		$\text{Эк} = 13,73 - 13,52\%$	$\text{Эк} = 13,11\%$

Рисунок 2.16 – Рациональные контрольные значения параметров отработавшего агента сушки, нагретого до 70 °С с подмешиванием свежего воздуха

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	
без подмешивания $\varphi = 4,43 - 7,51\%$		$t_{ц} = 57,91 - 61,27 \text{ °С}$	$t_{р} = 50,51 - 53,7 \text{ °С}$
10% подмешивания $\varphi = 4,06 - 6,59\%$		$\varphi = 70 \%$	$\text{Эк} = 18,14 - 17,91 \%$
20% подмешивания $\varphi = 3,69 - 5,71\%$		10% подмешивание $t_{ц} = 55,36 - 57,87 \text{ °С}$ $t_{р} = 48,08 - 50,47 \text{ °С}$ $\varphi = 70 \%$ $\text{Эк} = 17,91 - 17,91 \%$	20% подмешивание $t_{ц} = 52,84 - 54,61 \text{ °С}$ $t_{р} = 45,69 - 47,38 \text{ °С}$ $\varphi = 70 \%$ $\text{Эк} = 17,44\%$
30% подмешивания $\varphi = 3,32 - 4,88\%$		30% подмешивание $t_{ц} = 50,39 - 51,55 \text{ °С}$ $t_{р} = 43,36 - 44,47 \text{ °С}$ $\varphi = 70 \%$ $\text{Эк} = 16,74 - 16,98 \%$	40% подмешивание $t_{ц} = 48,05 - 48,74 \text{ °С}$ $t_{р} = 41,14 - 41,8 \text{ °С}$ $\varphi = 70 \%$ $\text{Эк} = 15,81\%$
40% подмешивания $\varphi = 2,95 - 4,1\%$			

Рисунок 2.17 – Рациональные контрольные значения параметров отработавшего агента сушки, нагретого до 100 °С с подмешиванием свежего воздуха

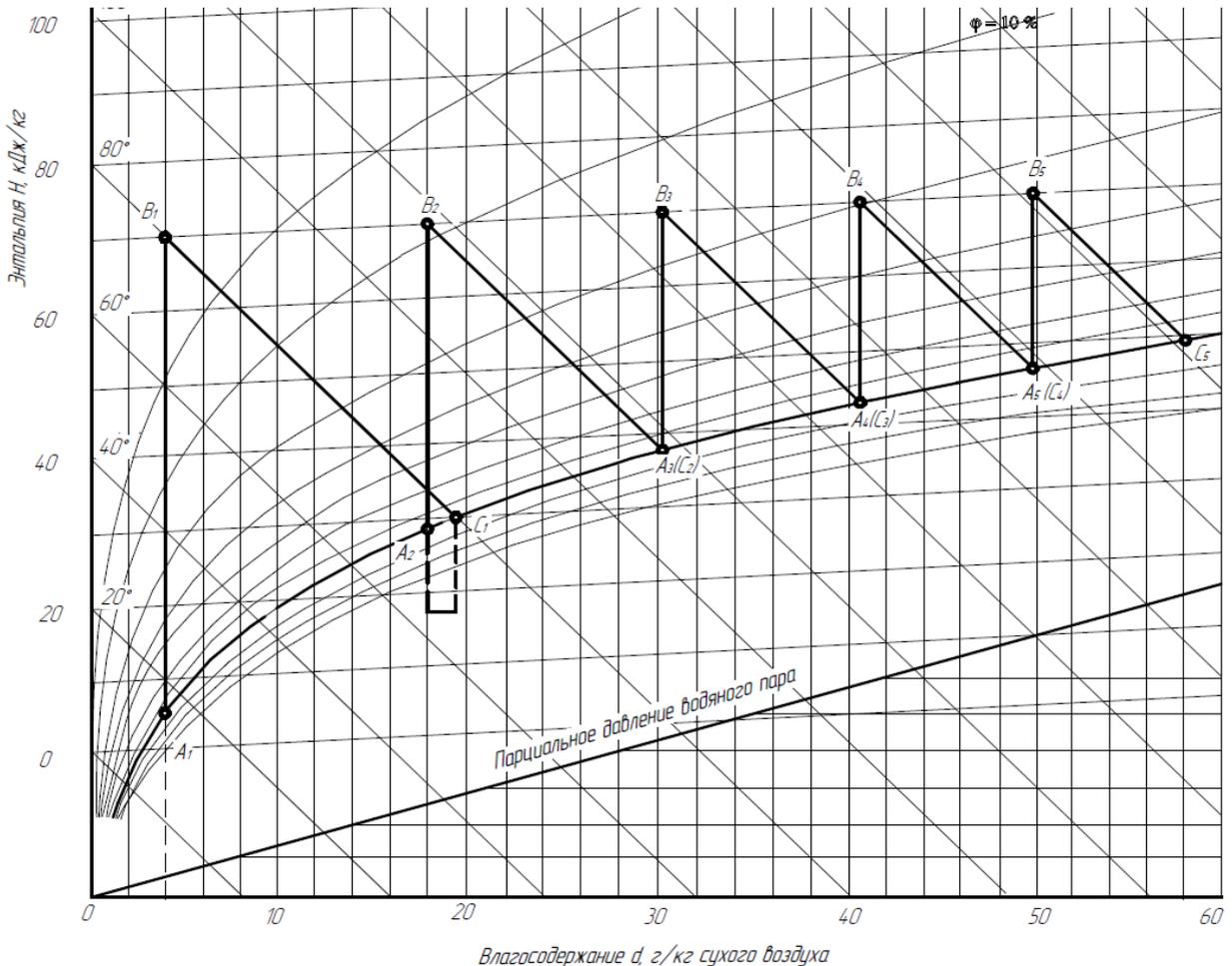
Проведенное нами исследование (приложение А) показало, что двух - пятикратное повторное использования теплоты отработавшего агента сушки с подмешиванием 10...20 % свежего воздуха приводит к снижению интегрального расхода энергии на сушку до 14,1...17,9 %. Установлено, что удержание тепловентиляционной системы в рациональном режиме возможно при контроле и управлении параметрами агента сушки на выходе из сушильной камеры.

2.4 Теоретическое обоснование теплотехнической эффективности рециркуляции сушильного агента при однократном подмешивании свежего воздуха и рациональных режимных параметров работы аэродинамического устройства для сушки зерна

В соответствии с методикой, описанной в п 2.3, рассчитывали влагосодержание, энтальпию, а также входные, рабочие и выходные параметры воздуха при однократном подмешивании свежего воздуха в процентном соотношении для того

или иного цикла использования теплоты отработавшего агента сушки. После замыкания системы агент сушки работает до достижения суммарно 5 циклов. Расчетная схема приведена на рисунке 2.18, исходные данные для расчета в таблице 2.2.

**Подмешивание 10% свежего воздуха к отработавшему агенту сушки
после 1 цикла**

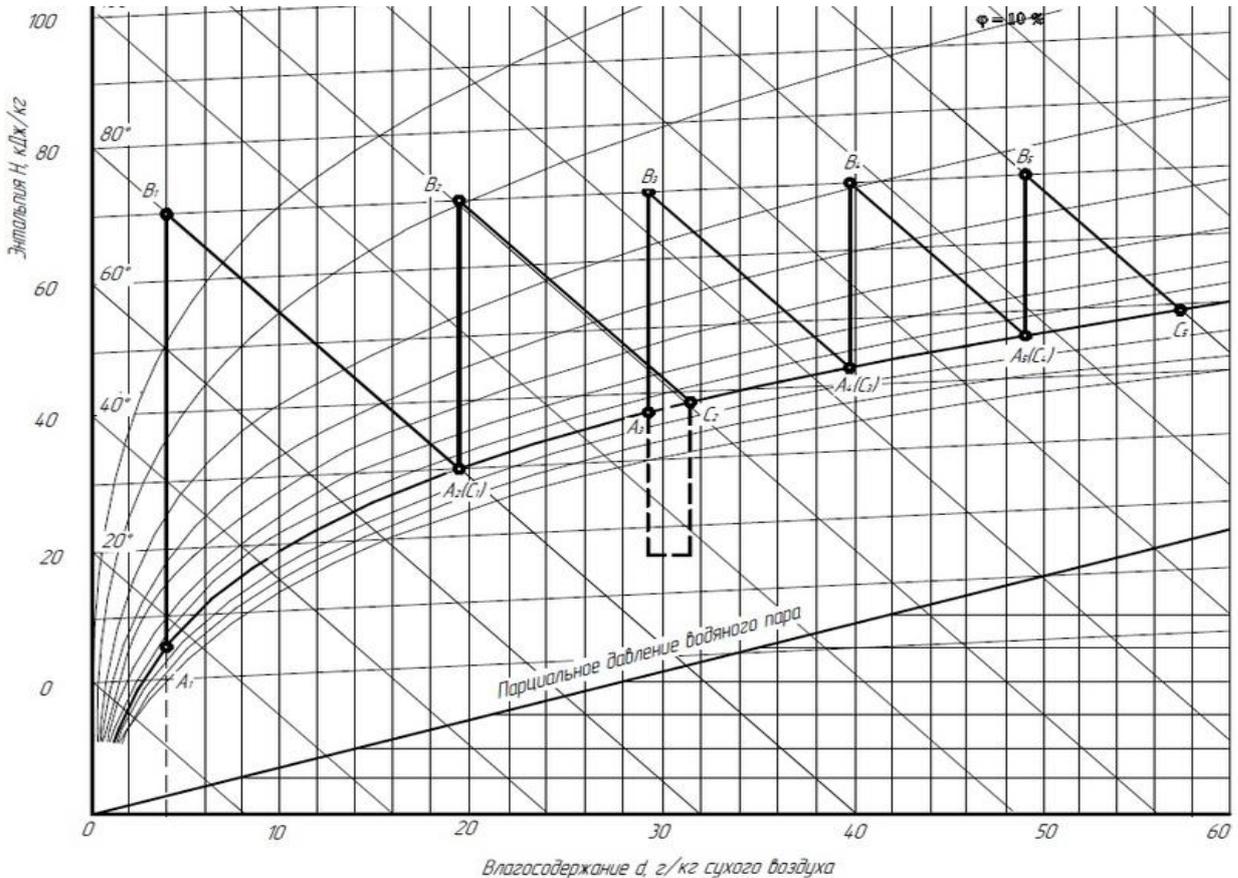


Точка A_2 - начальные параметры цикла при однократном подмешивании 10 % свежего воздуха

Рисунок 2.18 – Модель работы тепловентиляционной системы в режиме рециркуляции сушильного агента при однократном подмешивании 10 % свежего воздуха после 1 цикла сушки

По аналогии смоделируем по пять циклов нагрева сушильного агента до $70\text{ }^\circ\text{C}$ с подмешиванием 20...40% свежего воздуха и нагрева агента сушки до температуры 40 и $100\text{ }^\circ\text{C}$ с подмешиванием 10...40% свежего воздуха (рисунок 2.19).

**Подмешивание 10% свежего воздуха к отработавшему агенту сушки
после 2 цикла**



Точка A_3 - начальные параметры цикла при однократном подмешивании 10 % свежего воздуха

Рисунок 2.19 – Модель работы тепловентиляционной системы в режиме рециркуляции сушильного агента при однократном подмешивании 10 % свежего воздуха после 2 цикла сушки

По аналогии смоделируем по пять циклов нагрева сушильного агента до 70 °С с подмешиванием 20...40% свежего воздуха и нагрева агента сушки до температуры 40 и 100 °С с подмешиванием 10...40% свежего воздуха.

Результаты моделирования представлены в приложении А.

Однократное подмешивание 10...40 % свежего воздуха к агенту сушки с дальнейшим его нагревом до 70°С целесообразно только после однократного повторного использования теплоты отработавшего агента сушки, снижение интегрального расхода энергии на сушку достигает 14,96 %. При нагреве агента

сушки до 100°C с однократным подмешиванием 10...40 % свежего воздуха снижает интегральный расхода энергии на сушку до 17,9 %, что соответствует значениям постоянного подмешивания. Однако стоит учитывать тот факт, что для однократного подмешивания свежего воздуха необходимо систему открывать и закрывать, что значительно усложняет процесс управления сушилкой.

2.5 Теоретическое обоснование целесообразности применения рециркуляции отработавшего агента сушки по условию конденсации влаги

Теплотехническая эффективность рециркуляции показывает на сколько процентов тепловая мощность нагрева отработавшего агента сушки меньше тепловой мощности нагрева атмосферного воздуха. Для эффективности рециркуляции данная физическая величина должна быть положительной, в ином случае рециркуляции не имеет смысла [17].

В связи с тем, что рециркуляция агента сушки может осуществляться только при условии отсутствия конденсации влаги на поверхности материала, еще одним важным критерием эффективности является температура точки росы.

Температура точки росы [17], °C:

$$t_p = \frac{233,77 \ln Ph + 115,72}{16,57 - 233,77 \ln Ph} , \quad (2.14)$$

где Ph – парциальное давление насыщенного водяного пара, кПа.

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 °C. На рисунке 2.22, 2.23, 2.24 приведены расчетные зависимости температуры точки росы и температуры агента в конце цикла сушки при 70 °C и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха.

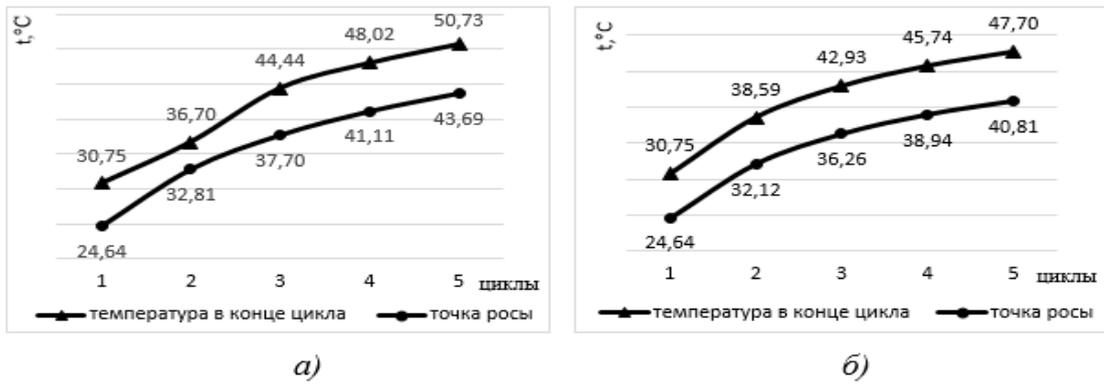


Рисунок 2.22 – Зависимость точки росы от температуры агента сушки в конце цикла сушки при 70° а) – при закрытом клапане; б) – при постоянном подмешивании 10% свежего воздуха

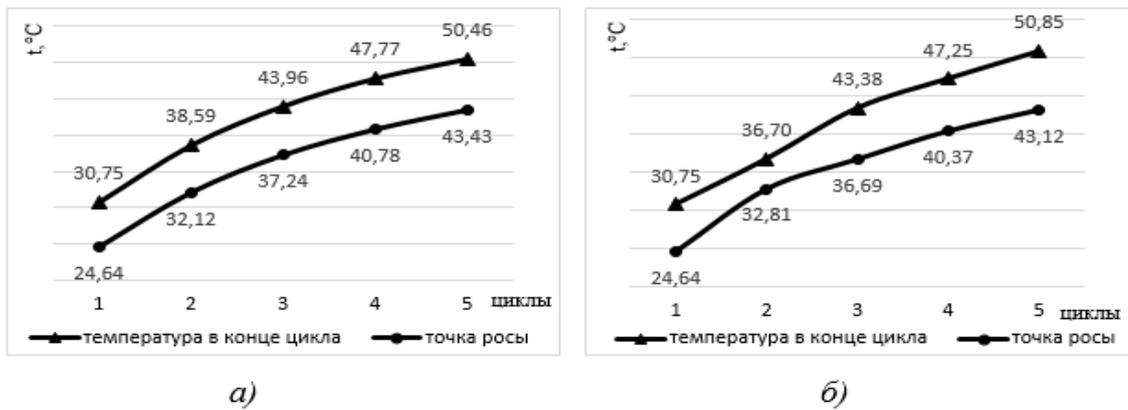


Рисунок 2.23 – Зависимость точки росы от температуры агента сушки в конце цикла при 70° и подмешивании 10% а)- после 1 цикла сушки; б)- после 2 цикла сушки

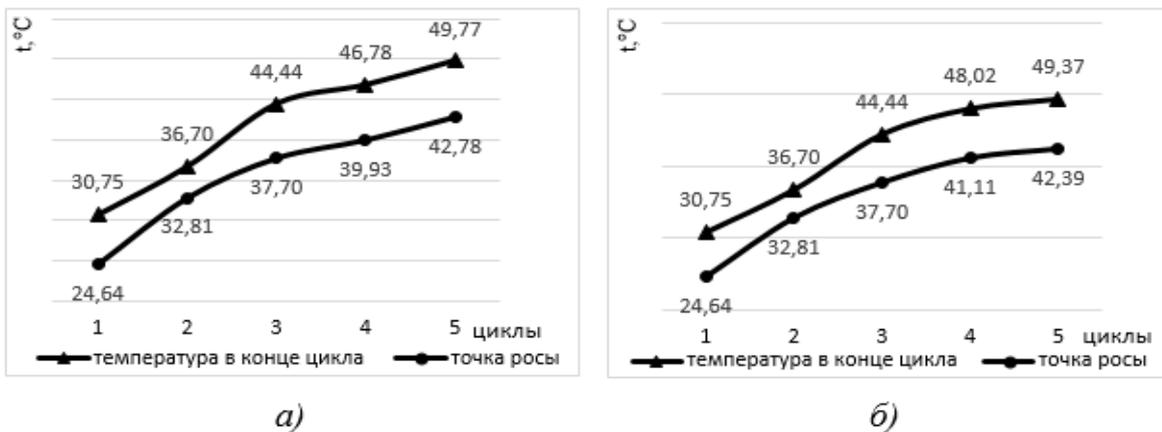


Рисунок 2.24 – Зависимость точки росы от температуры агента сушки в конце цикла при 70° и подмешивании 10 % а)- после 3 цикла сушки; б)- после 4 цикла сушки

Результаты теоретического расчета применения рециркуляции отработавшего агента сушки по условию конденсации влаги при нагреве агента сушки для 40 и 100°С представлены в приложении Б.

Проведенный анализ указывает на то, что отсутствует опасность конденсации влаги во всех исследуемых режимах работы тепловентиляционной системы, т.к. температура точки росы ниже температуры агента сушки в конце цикла сушки и температуры нагрева зерна на 6...10°С.

2.6 Влияние режимов работы системы рециркуляции агента сушки на аэродинамическую характеристику сети

При последовательном соединении вентиляторы устанавливаются один за другим, при этом каждый вентилятор пропускает весь объем воздуха Q . Для построения суммарной характеристики последовательно соединенных лопастных вентиляторов следует алгебраически складывать их давление при равных подачах. При работе последовательно соединенных лопастных вентиляторов в сети общую подачу и давление определяют по пересечению их суммарной характеристики с характеристикой сети [53].

На рисунке 2.25 представлены характеристика вентилятора №1 – радиальный вентилятор ВР 9-55 №10, $N=22$ кВт*ч, частота вращения– 1500 об/мин; вентилятора №2 – радиальный вентилятор ВР 280-46 №4 $N=11$ кВт*ч, частота вращения – 1450 об/мин; характеристика сети в различных режимах работы системы рециркуляции сушильного агента, построенная на основании полученных экспериментальных данных.

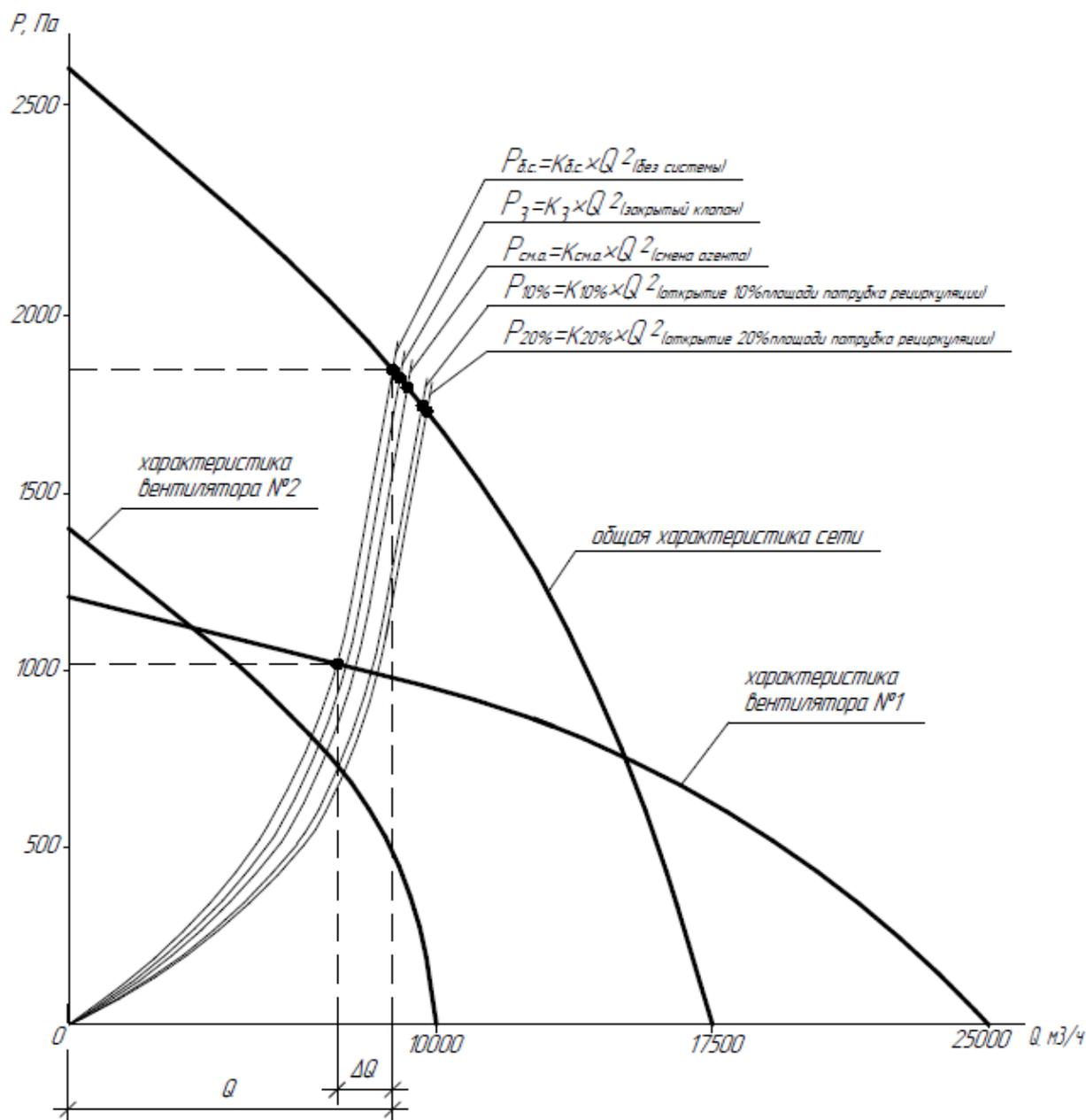


Рисунок 2.25 – Характеристика сети в различных режимах работы системы рециркуляции агента сушки аэродинамического устройства для сушки зерна

Очевидно, 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.

Выводы по разделу

1. Разработан «комплексный показатель совершенства конструкции зерновой сушилки», который учитывает обобщенные технико-экономические характеристики сушилки, упрощает сравнительный анализ и позволяет сельхозтоваропроизводителю выбрать лучшую сушилку.

2. Разработана конструкция аэродинамического устройства для сушки зерна, которая за счет применения системы рециркуляции отработавшего агента сушки обеспечивает значительное снижение энергоемкости процесса, снижение запыленности рабочей зоны. Применение вентилятора аспиратора обеспечивает снижение потерь подогретого воздуха через неплотности сушильной камеры, надежное смещение материала вдоль грузонесущей перегородки при его разгрузке, надежное удаление легких примесей, пыли.

3. Разработаны модели работы тепловентиляционной системы с повторным использованием теплоты отработавшего агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха и без подмешивания, позволяющие обоснованно подойти к выбору рациональных режимов работы тепловентиляционной системы при сушке зерна на различные цели в различных сушилках.

Работа тепловентиляционной системы при двух-трехкратном повторном использовании теплоты отработавшего сушильного агента, нагретого до 70 °С с постоянным подмешиванием 10 % свежего воздуха, обеспечивает экономию 13,73...14,14 % интегрального расхода энергии на сушку. При нагреве сушильного агента до 100 °С постоянным с подмешиванием 10 % свежего воздуха и увеличением количества циклов повторного использования теплоты сушильного агента до 4-5 достигается 17,91 % экономии интегрального расхода энергии.

4. Определены контрольные параметры необходимые для удержания тепловентиляционной системы в рациональном режиме. При нагреве сушильного агента сушки до 70 °С с подмешиванием 10 % свежего воздуха контрольные параметры на выходе из сушилки следующие: относительная влажность сушильного агента

70%, температура сушильного агента при двух-трехкратном повторном использовании теплоты отработавшего сушильного агента – 39...43 °С.

Контрольные параметры сушильного агента нагретого до 100 °С с подмешиванием 10 % свежего воздуха на выходе из сушилки следующие: относительная влажность сушильного агента 70 %, при увеличении количества циклов повторного использования теплоты сушильного агента до 4 – 5 температура сушильного агента составляет 55,36...57,87 °С.

Наилучшее использование теплоты агента сушки для испарения влаги из зерна при температуре агента сушки 70 °С достигается при двух-трехкратном его использовании, при температуре 100 °С – четырех-пятикратном.

При определении возможной конденсации влаги на исследуемых режимах сушки установлено, что, температура точки росы ниже температуры нагрева зерна на 6...10°С.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с поставленными задачами принята следующая программа научного исследования:

- разработать и изготовить аэродинамическое устройство для сушки зерна с системой рециркуляции агента сушки;
- исследовать качество работы аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащенного системой рециркуляции агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха и без подмешивания, определить оптимальные режимы его работы;
- провести технико-экономическую оценку результатов научного исследования.

3.1 Описание экспериментальных и производственных установок

В соответствии с принятой программой научного исследования был создан опытный образец аэродинамического устройства для сушки зерна с системой рециркуляции агента сушки (рисунок 3.1 – 3.3). Исходя из условий равномерного движения материала по перфорированной грузонесущей перегородке её ширина не должна превышать 600 мм, нами конструктивно была принята 550 мм. Длина грузонесущей перфорированной перегородки принята 5050 мм. [17]. Размеры камеры сушки, следующие: высота – 3000 мм, длина – 5000 мм, ширина – 2880 мм. Общая длина аэродинамического устройства для сушки зерна 7000 мм, ширина составляет 7000 мм, угол наклона грузонесущей перфорированной перегородки к горизонту – 4 градуса, коэффициент живого сечения – 8%. Внутренняя часть боковых воздухораспределительных каналов изготовлена из тканых сит с коэффициентом живого сечения 46%. Распределяющий воздухоподводящий патрубок, в который установлены поворотные заслонки, изготовлен из каркаса и ткани.



Рисунок 3.1 – Каркас аэродинамического устройства: 1 – неподвижная секция сдвижного зонта; 2 – окно пылеуловителя; 3 – звено сдвижного зонта; 4 – секция камеры сушки; 5 – выгрузное окно; 6 – грузонесущая перегородка; 7 – короб аэро-желоба; 8 – каркас камеры сушки; 9 – распределитель с заслонками



Рисунок 3.2 – Внутренняя оболочка камеры сушки: 1 – пояс из воздухо- и водоотталкивающей ткани; 2 – тканевое сито

Для подачи агента сушки и отбора отработавшего агента сушки установлены промышленные вентиляторы среднего давления ВР 9-55 10. Для подогрева агента сушки устройство оснащено теплогенератором TBL 85-P с горелкой Baltur, работающей на дизельном топливе.

3.2 Измерительные приборы

Производственная установка была оснащена всеми необходимыми приборами и системами для проведения испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55262-2012 [27].

В процессе проведения экспериментальных исследований, согласно принятой программе, измеряли и оценивали: температуру атмосферного воздуха; температуру агента сушки; температуру отработавшего агента сушки, температуру и влажность зерна; расход воздуха; расход агента сушки; расход отработавшего агента сушки, расход топлива; производительность по сушке; мощность электроэнергии, потребляемую устройством.



Рисунок 3.3 – Внешняя оболочка камеры сушки: 1 – соединительная часть внутренней оболочки; 2 – воздушный карман; 3 – распределитель с заслонками; 4 – крепление зонта к оболочке; 5 – боковые упоры; 6 – внешняя оболочка камеры сушки



Рисунок 3.4 – Опытный образец аэродинамического устройства для сушки зерна на опытном поле: 1 – теплогенератор; 2 – вентилятор для подачи агента сушки; 3 – оболочка сдвижного зонта; 4 – пылеуловитель; 5 – вентилятор аспиратор; 6 – воздушные патрубки; 7 – клапан-смеситель; 8 – боковой воздухоподводящий короб

Для измерения температуры атмосферного воздуха применялся измеритель регулятор ДТСхх5 с коммутационной головкой (рисунок 3.5), агента сушки и отработавшего агента сушки – электронный анемометр UNI-T UT362 (рисунок 3.6), а также карманный анемометр с крыльчаткой и сенсором влажности Testo 410-2 (рисунок 3.7). Температуру зерна до и после сушки определяли с помощью пирометра MS6530 (рисунок 3.10). Расход воздуха и агента сушки определяли косвенным методом с помощью многопредельного микроманометра с наклонной трубкой ММН-240 (рисунок 3.11), расход отработавшего агента сушки определяли косвенным методом с помощью электронного анемометра с крыльчаткой UNI-T UT362, установленным в конфузор (рисунок 3.6).

Расход топлива определяли по массе с помощью напольных весов (рисунок 3.8) методом отсечек по 10 секунд каждая. Число отсечек принималось равным 7. Время определяли по секундомеру TORNEO (рисунок 3.8). Определение влажности зерна проводили при помощи влагомеров ФАУНА и FARMPOINT (рисунок 3.9).

Потребляемая мощность электроэнергии замерялась при помощи счетика электрической энергии Меркурий 236. Замеряли потребляемую активную, реактивную (потери), а также полную энергию (рисунок 3.10).



а)



б)

Рисунок 3.5 – Измерительные приборы: а – Измеритель-регулятор температуры 2ТРМ1 + ДТСхх5 с коммутационной головкой; б – пирометр MS6530



Рисунок 3.6 – Измерительные приборы: электронный анемометр UNI-T UT362 с конфузуром, основание пирамиды 500*500 мм и высотой 500 мм, диаметр воздуховода 120 мм длина 400 мм, а – вид сбоку; б – вид снизу



Рисунок 3.7 – Измерительные приборы: а)- карманный анемометр с крыльчаткой и сенсором влажности Testo 410-2; б)- термоанемометр Testo 425

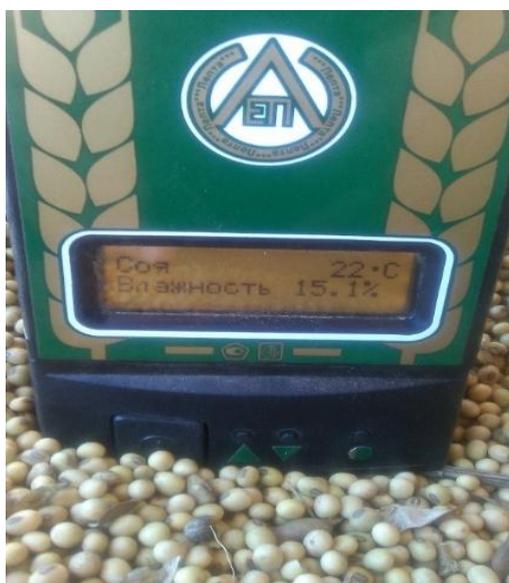


а)



б)

Рисунок 3.8 – Измерительные приборы: *а* – секундомер TORNEO; *б* – настольные электронные весы для определения расхода топлива

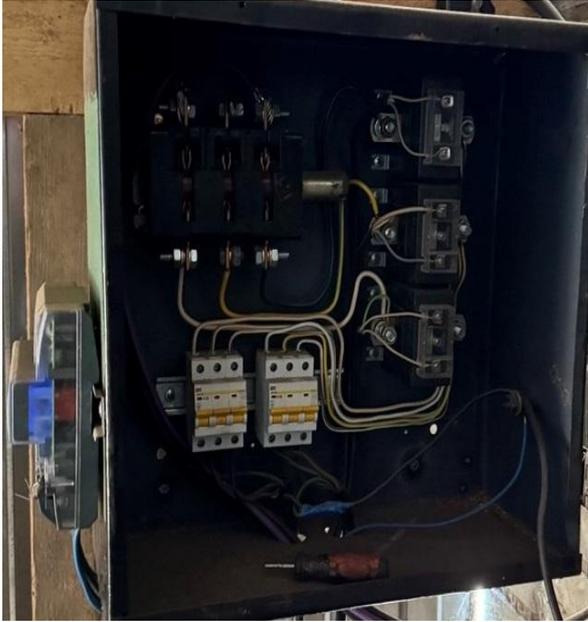


а)



б)

Рисунок 3.9 – Измерительные приборы: *а*) - влагомер ФАУНА; *б*) - влагомер Farmpoint-Digital



а)



б)

Рисунок 3.10 – Измерительные приборы: *а)* – ящик учета электрической энергии (рубильник, трансформаторы тока ТТИ-А 100/5А с шиной 5ВА, автоматический выключатель 50А D; *б)* - счетчик электрической энергии меркурий 236 ART-03 PQRS 3*230/400В, 5(10)А 50Гц



а)



б)

Рисунок 3.11 – Измерительные приборы: *а)* – многопредельный микрометр с наклонной трубкой ММН-240; *б)* – токоизмерительные клещи.

3.1 Методика лабораторного исследования определения аэродинамических характеристик камеры сушки

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 3.12, 3.13).

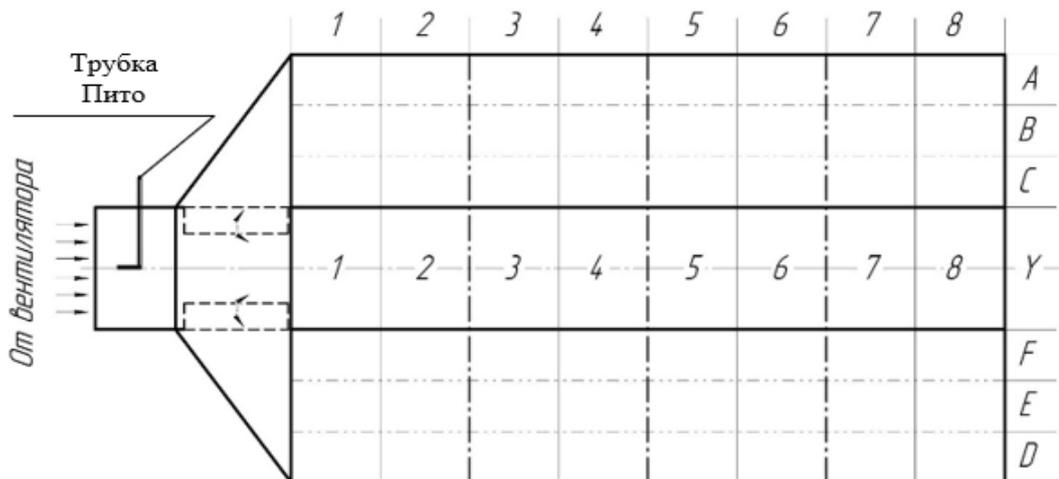


Рисунок 3.12 – Схема расположения мест замера: A, B, C, Y, D, E, F – горизонтальные плоскости замера; 1 – 8 – ячейки замера расхода воздуха на поверхности боковых воздухоподводящих полостей и жесткой перфорированной грузонесущей перегородки

На входе в распределяющий воздухоподводящий патрубок 3 (рисунок 3.3) были установлены трубки Пито для определения расхода воздуха косвенным методом по многопредельному микроманометру с наклонной трубкой ММН-240 (рисунок 3.11). На поверхностях тканевых сит боковых воздухоподводящих полостей и жесткой перфорированной грузонесущей перегородки для определения

расхода воздуха косвенным методом в ячейках $I - 8$ в сечениях A, B, C, Y, D, E, F устанавливали конфузор с электронным анемометром UNI-T UT362 (рисунок 3.6).

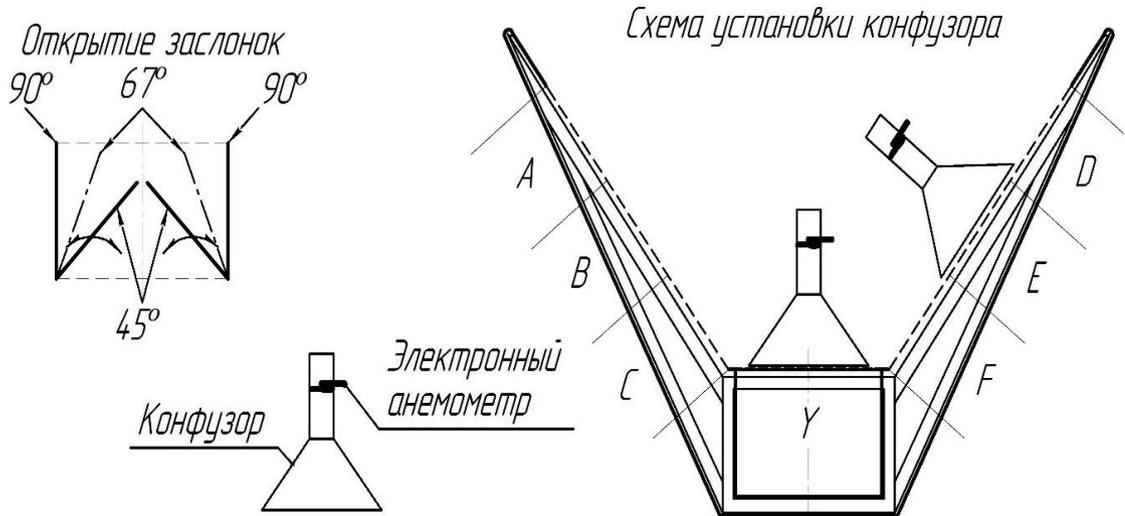


Рисунок 3.13 – Схема расположения оборудования для замера аэродинамических характеристик и величины угла открытия заслонок распределяющего воздухоподводящего патрубка: A, B, C, Y, D, E, F – сечения замеров

В качестве основного фактора (рисунок 3.14) было принято положение заслонок воздухоподводящего патрубка X . Уровни варьирования приняты следующие: 90° – заслонки зарыты; 45° – заслонки полностью открыты и 67° – среднее положение заслонок (рисунок 3.12).

Выходной величиной (откликом) являлся: расход воздуха после прохождения тканевых сит, Q_c , $\text{м}^3/\text{ч}$, и перфорированной перегородки, Q_n , $\text{м}^3/\text{ч}$; потребляемая мощность электроэнергии, $N_{\text{эл.}}$, кВт·ч.

Контролируемые факторы: атмосферное давление воздуха $P_{\text{атм.}}$, Па; температура наружного воздуха $t_{\text{н.в.}}$, $^\circ\text{C}$; влажность воздуха $\varphi_{\text{н.в.}}$, %; расход воздуха на входе в распределяющий воздухоподводящий патрубок, Q_n , $\text{м}^3/\text{ч}$.

Модель определения аэродинамических характеристик камеры сушки аэродинамического устройства для сушки зерна приведена на рисунке 3.14.

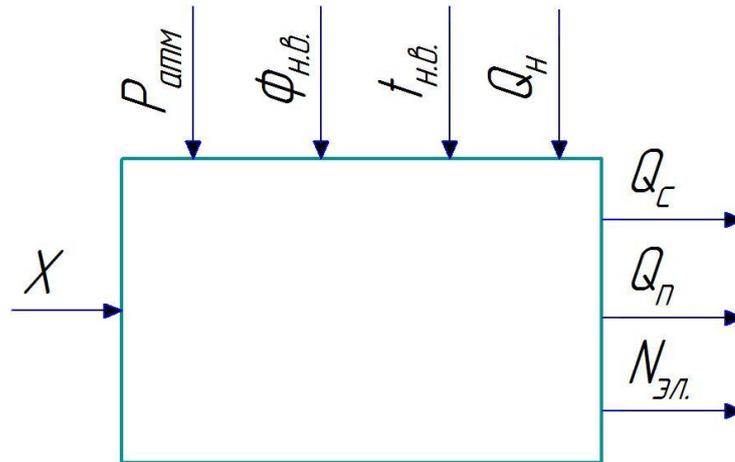


Рисунок 3.14 – Модель определения аэродинамических характеристик камеры сушки аэродинамического устройства для сушки зерна

Опыт проводился следующим образом: запускался вентилятор 2 (рисунок 3.4), после выхода на режим замерялся расход воздуха на входе в распределяющий воздухоподводящий патрубок 3 (рисунок 3.3), затем устанавливалось необходимое положение заслонок в распределяющем воздухоподводящем патрубке (рисунок 3.12), далее замерялась скорость исходящего воздуха в ячейках 1 – 8 в сечении Y, устанавливая конфузор с электронным анемометром UNI-T UT362 (рисунок 3.6), полученные данные заносились в таблицу.

Далее замерялась скорость исходящего воздуха на поверхности тканевых боковых воздухоподводящих полостей и жесткой перфорированной грузонесущей перегородки в ячейках при среднем положении заслонок 67° (рисунок 3.13), 1 – 8 в сечениях A, B, C, Y, D, E, F, устанавливая конфузор с электронным анемометром UNI-T UT362 (рисунок 3.6), процесс повторяли при положении заслонок 45° (рисунок 3.13).

При каждом положении заслонок замеряли потребляемую мощность электроэнергии токоизмерительными клещами (рисунок 3.11) косвенным методом.

После проведения экспериментов рассчитывали средние значения полученных результатов, которые приведены в разделе 4.1 и приложении В.

Расход воздуха Q рассчитывали по формуле [116]:

$$Q = v \cdot F \cdot 3600, \quad (3.1)$$

где v – скорость воздушного потока, м/с;

F – площадь поверхности зерна, м².

Скорость фильтрации v , рассчитывали по следующей формуле [116]:

$$v = \frac{\sum Q_i}{F_{к.с} \cdot 3600}, \quad (3.2)$$

где $\sum Q_i$ – средний расход воздуха по всей камере сушки; м³/ч;

$F_{к.с}$ – площадь поверхности зерна всей камеры сушки, м².

Среднее значение расхода воздуха по всей камере сушки A определяли по следующей зависимости [63]:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (3.3)$$

3.2 Методика определения влияния системы рециркуляции на распределение агента сушки в заполненной зерном сушильной камере

Исследование с целью определения области рациональных значений основных технологических параметров разработанного аэродинамического

устройства для сушки зерна проводилось на опытном поле ФГБОУ ВО Костромской ГСХА и в ЗАО «Шунга» Костромской области. Модель исследования по определению аэродинамических характеристик в загруженной камере сушки изображен на рисунке 3.15.

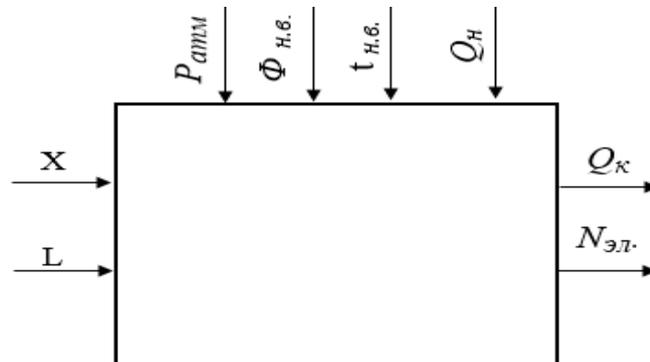


Рисунок 3.15 – Модель исследования по определению аэродинамических характеристик в загруженной камере сушки

Схема системы рециркуляции аэродинамического устройства для сушки зерна [20], представлена на рисунке 3.16.

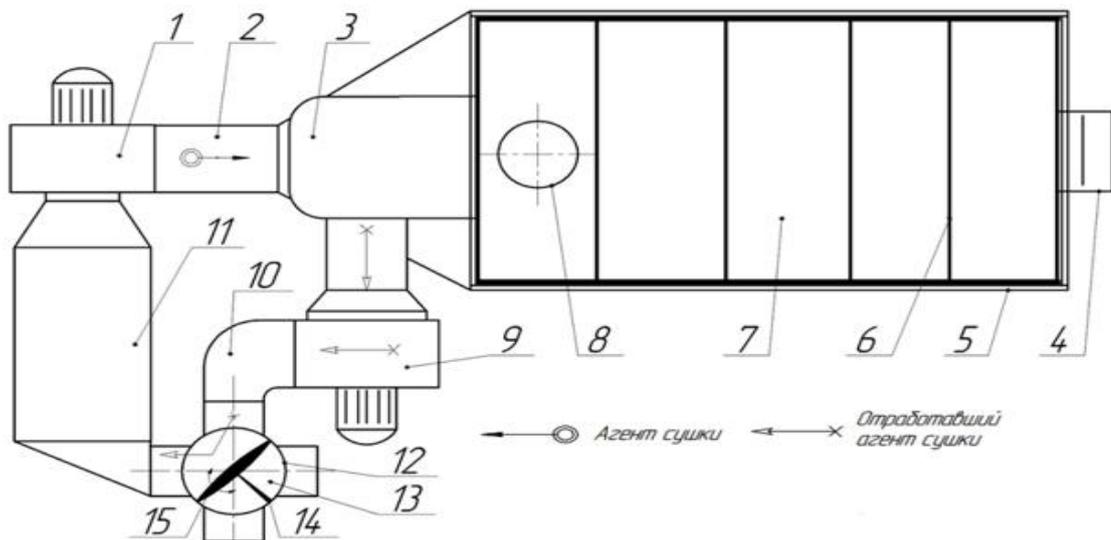


Рисунок 3.16 – Схема системы рециркуляции аэродинамического устройства для сушки зерна: 1 – вентилятор; 2, 10 – воздуховод; 3 – пылеуловитель; 4 – выгрузное окно; 5 – камера сушки; 6 – стойка каркаса зонта; 7 – сдвижной зонт; 8 – загрузочное отверстие; 9 – вентилятор аспиратор; 11 – теплогенератор; 12 – выпускной патрубков клапана-смесителя; 13 – клапан-смеситель; 14 – неподвижная заслонка клапана-смесителя; 15 – поворотная заслонка клапана-смесителя

Выходной величиной (откликом) принят расход отработанного агента сушки после прохождения через материал, Q_k , м³/ч; °С. Контролируемые факторы: атмосферное давление воздуха $P_{атм}$, Па; влажность партии зерна w_z , %; температура наружного воздуха $t_{н.в.}$, °С; относительная влажность воздуха $\phi_{н.в.}$, %; расход воздуха на входе в распределяющий воздухоподводящий патрубок, Q_n , м³/ч.

Исследовали распределения воздушных потоков на поверхности зерна в камере сушки работающей системы рециркуляции отработанного агента сушки аэродинамического устройства для сушки зерна в местах $1^* \dots 12^*$ сечений A, B, C, D , в соответствии со схемой (рисунок 3.18) в зависимости от положения поворотной заслонки клапана-смесителя.

«В качестве основного фактора принято положение поворотной заслонки клапана-смесителя L (рисунок 3.15), она устанавливалась в следующие положения (рисунок 3.17): I – заслонка закрыта, полная рециркуляция отработанного агента сушки; II – частичное подмешивание свежего воздуха, открытие 10 – 20 % площади патрубка рециркуляции; III – заслонка открыта, полная смена агента сушки» [20].

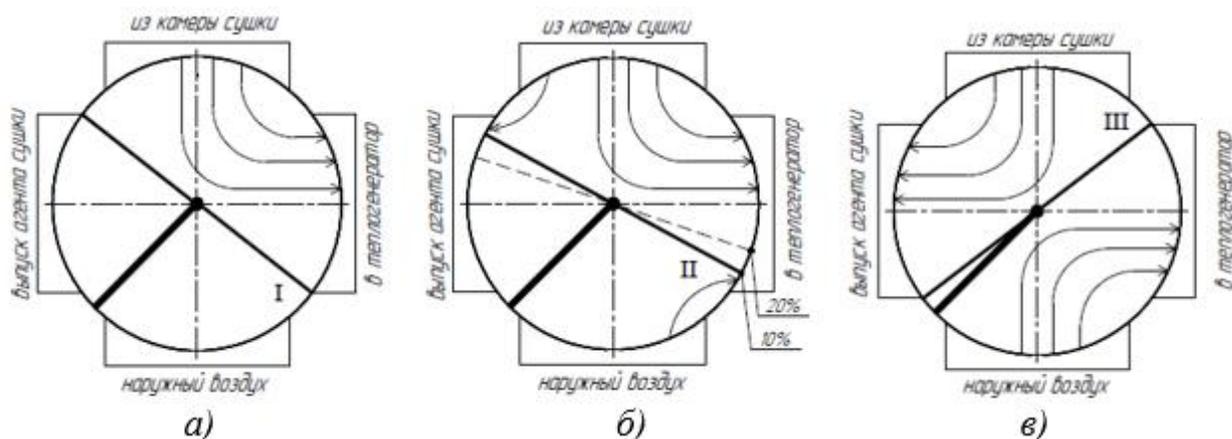


Рисунок 3.17 – Положение поворотной заслонки клапана-смесителя при различных режимах работы системы рециркуляции агента сушки: а – полная рециркуляция, заслонка в положении I; б – частичное подмешивание, заслонка в положении II, открытие 10...20 % площади патрубка рециркуляции; в – смена агента сушки, заслонка в положении III

Опыт проводили следующим образом: запускали вентиляторы 2 и 5 (рисунок 3.16), заслонки в распределяющем воздухоподводящем патрубке устанавливали в полностью открытое положение – режим вентиляции (рисунок 3.13). После выхода на режим, устанавливали необходимое положение заслонки клапана-смесителя (рисунок 3.17), далее измеряли скорости и напоры воздушных потоков в камере сушки, при этом на поверхности материала для определения расхода исходящего воздуха в местах $1^* \dots 12^*$ сечений A, B, C, D в соответствии со схемой (рисунок 3.18 [20]) установили конфузор с электронным анемометром UNI-T UT362 (рисунок 3.6). Площадь поверхности зернового вороха составляла 15 м^2 .

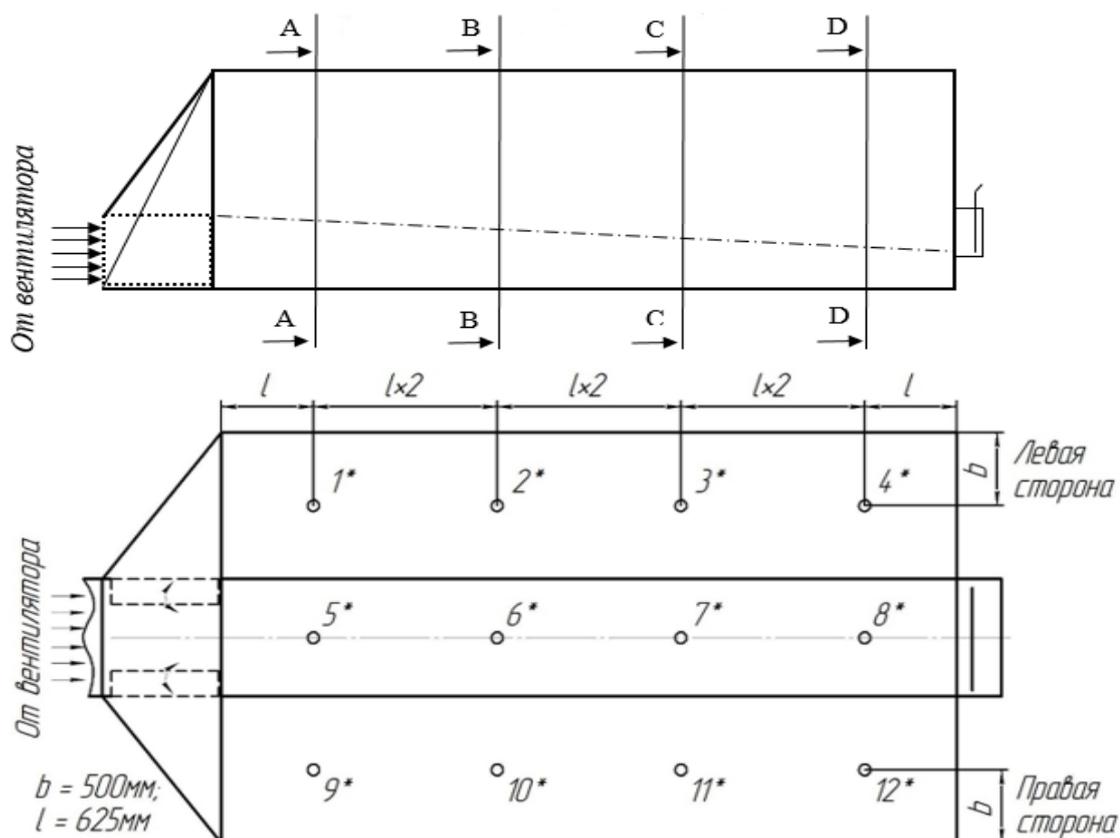


Рисунок 3.18 – Схема мест замера влажности и расхода отработавшего агента сушки на поверхности зерна: $1^* - 12^*$ – места замера влажности и расхода отработавшего агента сушки на поверхности материала в сечениях A, B, C, D

Для определения эффективности аэродинамической системы проведён эксперимент без системы рециркуляции, сдвижной зонт находился в открытом положении.

Полученные данные приведены в таблице приложения Д.

Основные статистические характеристики рассчитывали по следующей методике [18].

Дисперсия S определялась по зависимости:

$$S = \frac{\sum(Y_i - Y_{cp})^2}{n - 1}, \quad (3.4)$$

где Y_i – i -й элемент выборки;

Y_{cp} – среднее арифметическое;

n – количество повторностей.

Среднеквадратическое отклонение, σ , рассчитывалось по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - Y_{cp})^2}{n - 1}}, \quad (3.5)$$

Коэффициент вариации, v , рассчитывался как:

$$v = \frac{S}{Y_{cp}} \cdot 100, \quad (3.6)$$

где S – среднеквадратическое отклонение.

3.3 Методика проведения производственных испытаний аэродинамического устройства для сушки зерна

При моделировании процесса сушки зерна в периодическом режиме работы устройства выходными величинами приняты: температура агента сушки внутри аэрожелоба, $t_{\text{аэп.}}$, °С; расход отработанного агента сушки после прохождения через материал, $Q_{\text{к}}$, м³/ч; температура отработанного агента сушки, $t_{\text{о.а.с.}}$, °С; влажность материала во время сушки, $w_3^{\text{к}}$, %; температура семян во время сушки, $t_{\text{з.к.}}$, °С; расход топлива, $q_{\text{т}}$, кг/ч; потребляемая мощность электроэнергии, $N_{\text{эл.}}$, кВт·ч.

Контролируемые факторы: атмосферное давление воздуха $P_{\text{атм}}$, Па; начальная влажность поступившей партии $w_3^{\text{н}}$, %; температура партии начальная $t_{\text{з.н.}}$, °С; температура наружного воздуха $t_{\text{н.в.}}$, °С; относительная влажность воздуха $\phi_{\text{н.в.}}$, %; расход воздуха на входе в распределяющий воздухоподводящий патрубков, $Q_{\text{н}}$, м³/ч.

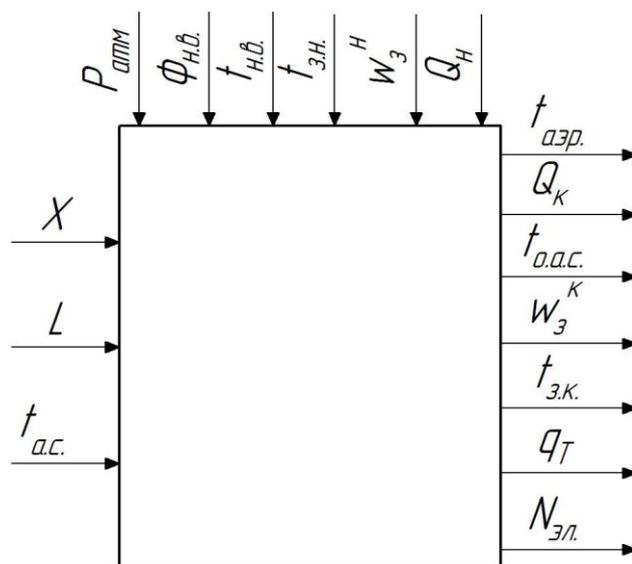


Рисунок 3.19 – Моделирование процесса сушки зернового вороха в производственных условиях на аэродинамическом устройстве для сушки зерна

Основными факторами приняты: положение поворотной заслонки клапана-смесителя L (рисунок 3.17); положение поворотных заслонок воздухоподводящего патрубка X (рисунок 3.13), температура агента сушки, $t_{a.c}$.

Для сравнения эффективности системы рециркуляции отработавшего агента сушки полученные показатели энергоэффективной сравнивали с результатами испытания «Устройства для вентилирования и транспортирования зернового вороха» [85], послужившего прототипом разработки.

Испытания проводили на 3 режимах работы системы рециркуляции.

«В режиме полной рециркуляции поворотная заслонки клапана-смесителя устанавливалась в положении I - закрыта (рисунок 3.17, а), отработавший агент сушки полностью направлялся на повторное использование для быстрого прогрева системы и снижения энергозатрат при выводе сушилки на рабочий режим.

В режиме частичной рециркуляции поворотная заслонки клапана-смесителя устанавливалась в положении II – открывалось 10, 20 % площади патрубка рециркуляции (рисунок 3.17, б). В этом режиме часть отработавшего агента сушки направлялась на рециркуляцию и смешивалась со свежим воздухом, направлялась на подогрев в теплогенератор, остальная часть выбрасывалась в атмосферу.

В режиме смены агента сушки поворотная заслонки клапана-смесителя устанавливалась в положении III – полностью открыта (рисунок 3.17, в). Отработавший агент сушки полностью направлялся в атмосферу, на его смену в теплогенератор поступал свежий атмосферный воздух» [20].

«Загружали камеру сушки зерном, замеряли его влажность. Для выхода на режим переводили поворотную заслонку клапана-смесителя в положение I – заслонка закрыта» [20]. Закрывали сдвижной зонт камеры сушки, запускали вентиляторы 1, 9 и теплогенератор 1 (рисунок 3.4). После достижения температуры агента сушки – 70, 100°C, переводили поворотную заслонку в положение II – открытие 10-20 % площади патрубка рециркуляции, температура отработавшего агента сушки

находилась в температурном диапазоне соответствующем двух-трёхкратному повторному использованию теплоты отработавшего агента сушки при его нагреве до 70 °С и четырех-пятикратному при температуре 100°С.

В случае превышения температурных показателей переводили заслонку клапана-смесителя в режим «смены агента сушки» до достижения необходимых значений, затем возвращали заслонку в исходное положение.

«Расход топлива замеряли методом отсечек при помощи напольных весов (рисунок 3.12). Расход электроэнергии на привод вентилятора замеряли при помощи трёхфазного электрического счетчика (рисунок 3.14). Периодичность замеров – 1 час. При достижении кондиционной влажности зернового вороха теплогенератор 11 выключали, поворотную заслонку клапана-смесителя переводили в режим III, охлаждали зерно» [20].

Результаты производственного эксперимента приведены в таблице приложения Е.

Пропускную способность сушилки по влажному зерну G_1 , кг/ч [9] определяли по зависимости:

$$G_1 = G_3 \cdot \frac{100 - \omega_3}{100 - \omega_1}, \quad (3.7)$$

где G_3 -пропускная способность по сухому зерну, кг/ч;

ω_1 - влажность зерна до сушки, %;

ω_3 -влажность зерна после охлаждения, %;

Общее количество испаренной влаги из сушилки ω_{1-3} , кг/ч [9]:

$$\omega_{1-3} = G_1 \cdot \frac{\omega_1 - \omega_3}{100 - \omega_3}, \quad (3.8)$$

Производительность сушилки A , пл.т/ч [9]:

$$A = \frac{G_1 \cdot k_B \cdot k_k}{1000}, \quad (3.9)$$

где k_B – коэффициент пересчета массы просушенного зерна в плановые в зависимости от культуры и назначения зерна;

k_k – коэффициент пересчета массы просушенного зерна в плановые в зависимости от влажности зерна до и после сушки.

Удельный расход топлива b , кг/пл.т [9]:

$$b = \frac{B}{A}, \quad (3.10)$$

где B - количество топлива, кг/ч;

Фактический расход теплоты q_f , МДж/кг.исп.вл. [9]:

$$q = \frac{B \cdot Q_H^p}{\omega_{1-3}}, \quad (3.11)$$

где Q_H^p - теплотворная способность физического топлива, МДж/кг;

Приведенный расход теплоты $q_{пр}$, МДж/кг.исп.вл. [23]:

$$q_{пр} = q_f - q_{н.в.} - q_m, \quad (3.12)$$

где $q_{н.в.}$ – расход теплоты на нагрев наружного воздуха, МДж/кг.исп.вл.;

q_m – расход теплоты на нагрев материала в сушилке, *МДж/кг.исп.вл.*;

Расход теплоты на нагрев наружного воздуха, идущего на смешивание с топочными газами $q_{н.в.}$, *МДж/кг.исп.вл.* [23]:

$$q_{н.в.} = l \cdot C_c \cdot (5 - t_0), \quad (3.13)$$

где l – удельный расход теплоносителя, *кг/кг.исп.вл.*;

C_c – теплоемкость сухих газов, 1,01 кДж/кг °С

t_0 – температура наружного воздуха, °С

Расход теплоты на нагрев материала в сушилке q_m , *МДж/кг.исп.вл.*, при τ материала > 0 [23]:

$$q_m = \frac{100 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} \cdot C_1 (5 - \tau_1), \quad (3.14)$$

где C_1 – теплоемкость при влажности ω_1 , *МДж/кг · °С*;

τ_1 – температура исходного материала, °С.

$$C_1 = \frac{\omega_1 \cdot C_B}{100} + \frac{(100 - \omega_1) \cdot C_{с.м.}}{100}, \quad (3.15)$$

где C_B – теплоемкость воды *МДж /кг · °С*, $C_B = 4,19$;

$C_{с.м.}$ – теплоемкость сухого материала *МДж /кг · °С*, $C_{с.м.} = 1,55$ для зерна

Интегральный расход энергии $q_{ин.э}$, *МДж/кг.исп.вл.* [23]:

$$q_{ин.э} = K_э \cdot q_э + q_{пр}, \quad (3.16)$$

где K_3 – коэффициент тепловой эквивалентности, учитывающий затраты на производство и транспортирование электроэнергии к потребителю, $МДж/кВт\cdotч$ ($K_3=10,137 МДж/кВт\cdotч$);

q_3 – удельная мощность на привод вентилятора, $МДж/кг.исп.вл.$;

Удельная мощность на привод вентилятора q_3 , $МДж/кг.исп.вл.$ [23]:

$$q_3 = \frac{S \cdot 10,137}{\omega_{1-2}}, \quad (3.17)$$

где S – расход полной энергии, $кВА/ч$;

ω_{1-2} – количество испаренной влаги из сушилки до охлаждения, $кг/ч$.

Расход полной электроэнергии S , $кВА/ч$ [1]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (3.18)$$

где P – расход активной энергии, $кВт/ч$;

Q – расход реактивной энергии, $кВАр/ч$.

3.4 Методика управления заслонкой клапана-смесителя системы рециркуляции отработавшего агента сушки аэродинамического устройства для сушки зерна

«Известно, что автоматизированные системы исключают необходимость постоянного контроля со стороны оператора, тем самым снижается нагрузка на персонал и уменьшается вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором. Для автоматического управления процессом сушки использовали систему на базе

PLC – программируемых логических контроллеров или SCADA-систем, представляющих собой комплексное программно-техническое решение для контроля, управления и мониторинга технологическими процессами» [21].

«Для поддержания оптимальных параметров сушки и обеспечения минимальных трудозатрат оператора при управлении поворотной заслонки клапана – смесителя системы рециркуляции агента сушки, нами разработана система автоматического управления поворотной заслонкой клапана-смесителя. Поддержание требуемого значения относительной влажности агента сушки осуществлялось путем установки поворотной заслонки клапана-смесителя в положение, определяемое блоком управления, исходя из режимов работы аэродинамического устройства, описанных ранее. Для удержания заслонки на месте использовали электрический сервопривод с заложенным принципом пропорционального управления. За основу была взята автоматизированная система управления технологическим процессом (далее АСУ ТП), предназначена для контроля и немедленной сигнализации при выходе системы за пределы установленных значений» [21].

Схема работы системы автоматического управления заслонкой клапана-смесителя системы рециркуляции агента сушки представлена на рисунке 3.20.

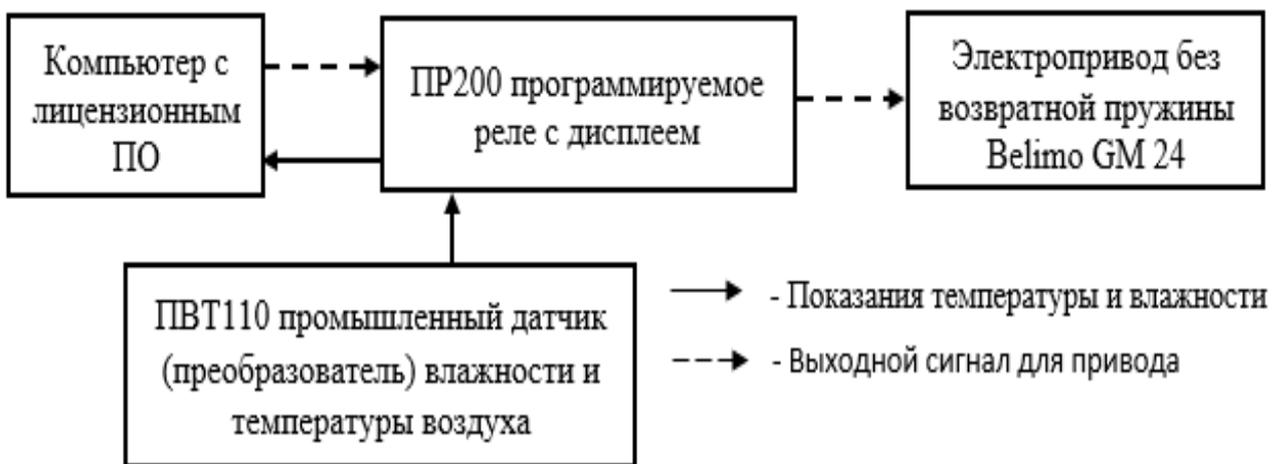


Рисунок 3.20 – Схема работы системы автоматического управления заслонкой клапана-смесителя системы рециркуляции отработавшего агента сушки

«Все АСУ ТП являются многоуровневыми системами. Верхний уровень представляет собой SCADA систему, являющуюся комплексным программно-техническим решением для контроля, управления и мониторинга технологическими процессами. Серверы баз данных, автоматизированные рабочие места оперативного персонала (далее АРМ), представляют собой непосредственно сам сервер со SCADA. На серверах хранится вся собираемая информация с привязкой к дате и времени, АРМы отображают мнемосхему контролируемого объекта и текущие оперативные параметры, а сервер SCADA занимается сбором данных с подключенных контроллеров объекта. В системе автоматического управления поворотной заслонкой клапана - смесителя, компьютер с лицензионным ПО включает в себя сервер баз данных, АРМ и сервер SCADA» [21].

«На среднем уровне АСУ ТП расположены контроллеры управления, основная задача которых управлять по заданной программе исполнительными механизмами, собирать данные с различных контрольных датчиков и передавать их на верхний уровень. В системе автоматического управления заслонкой клапаном–смесителем роль контроллера выполняет программируемое реле ПР200, оно передает в SCADA значение температуры и влажности, а также текущее задаваемое значение угла открытия заслонки. Из SCADA программируемое реле получает заданное значение влажности, которое необходимо поддерживать. Обмен данными с верхним уровнем, а также получение значений температуры и влажности с советующего датчика осуществляется по интерфейсу RS485 в протоколе Modbus RTU» [21].

«На нижнем или полевом уровне АСУ ТП также находятся различные измерительные датчики и исполнительные механизмы. В системе автоматического управления поворотной заслонкой клапана-смесителя находятся промышленный датчик - преобразователь влажности и температуры воздуха ПВТ110 и электропривод без возвратной пружины Belimo GM24» [21].

«Для поддержания заданного значения и обмена данными с датчиком и исполнительными механизмами, для программируемого реле ПР200 написана про-

грамма в среде программирования OWEN Logic на языке FBD» [21]. Основой программы является ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор), который является устройством обратной связи, используемым для регулирования процессов в промышленных системах. Он работает на основе трех основных компонентов: пропорциональной (P), интегральной (I) и дифференциальной (D) составляющих. ПИД-регулятор рассчитывает управляющий сигнал, который подается на исполнительное устройство, чтобы поддерживать процесс на заданном уровне или в заданном режиме. Существует специальная формула для формирования сигнала, $Y_i, \%$:

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \cdot \left[E_i + \tau_d \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{\text{изм}}} + \frac{1}{\tau_u} \sum_{i=0}^n E_i \Delta t_{\text{изм}} \right] \cdot 100, \quad (3.19)$$

где X_p – полоса пропорциональности;

E_i – рассогласование;

$\tilde{\tau}_d$ – постоянная временная дифференцированная;

ΔE_i – разность между двумя соседними измерениями E_i и E_{i-1} ;

$\Delta t_{\text{изм}}$ – время между двумя соседними измерениями t_i и t_{i-1} ;

$\tilde{\tau}_u$ – постоянная времени интегрирования;

$\sum E_i$ – накопленная в i -й момент времени сумма рассогласований (интегральная сумма).

Owen Logic – программно-аппаратная система автоматизации, разработанная компанией «Owen Electric», которая предоставляет широкие возможности для управления промышленными процессами, включая контроль температуры, давления, влажности и других параметров. Owen Logic поддерживают программируемые реле ПР200 необходимое системы автоматического управления заслонкой клапана-смесителя.

Интеграция ПИД-регулятора в Owen Logic позволила создать систему управления процессом подмешивания свежего воздуха к отработавшему агенту сушки в системе рециркуляции. Данный принцип работы реализован следующим образом:

- произвели настройку ПИД-регулятора для конкретной задачи управления, а именно поддержания определенной относительной влажности отработавшего агента сушки, также была произведена настройка коэффициентов P, I, D и настройка предельных значений времени интеграции, и дифференциации;

- интегрировали ПИД-регулятор в систему Owen Logic с помощью соответствующих интерфейсов и коммуникационных протоколов, что позволило получать данные о состоянии процесса и передавать управляющие сигналы на исполнительные устройства;

- настроили мониторинг и управление процессом регулирования угла открытия поворотной заслонки клапана-смесителя, используя данные, предоставляемые ПИД-регулятором, что позволило в реальном времени отслеживать параметры процесса и вносить корректировки в настройки.

В программу Owen Logic при помощи «менеджера компонентов», была произведена загрузка функционального блока ПИД-регулятора (рисунок 3.21).

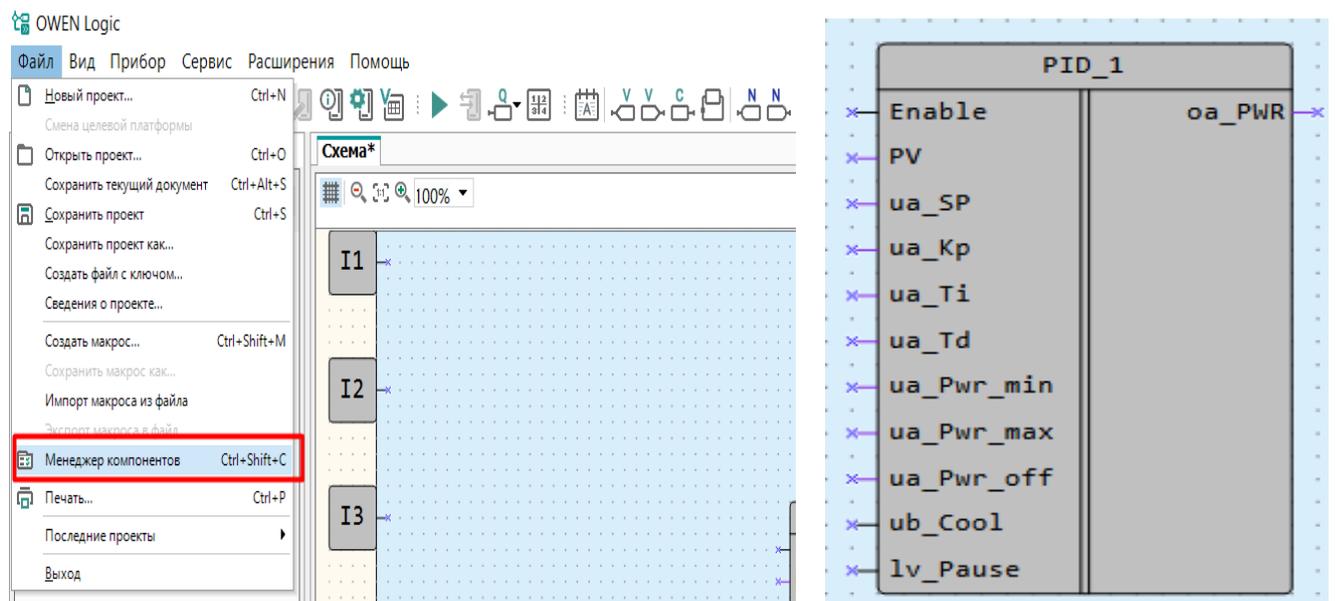


Рисунок 3.21 – Окно программы Owen Logic с функциональным блоком ПИД-регулятора

Таблица 3.1 – Описание входов и выходов функционального блока

Входы	Тип данных	Пояснения	Диапазон
Enable	Bool	Разрешение работы	0 – Запрещена 1 – Разрешена
PV	Float	Измеряемая величина	
ua_SP	Float	уставка	≥ 0
ua_Kp	Float	Пропорциональный коэффициент	≥ 0
ua_Ti	Float	Интегральный коэффициент	≥ 0
ua_Td	Float	Дифференциальный коэффициент	
ua_Pwr_min	Float	Минимальная выходная мощность	
ua_Pwr_max	Float	Максимальная выходная мощность	
ua_Pwr_off	Float	Мощность в выключенном состоянии	
ub_cool	Bool	Режим сушки	0 – Закрыто 1 – Открыто
lv_pause	Bool	Фиксация рассчитанной мощности	
Выходы	Тип данных	Пояснения	Диапазон
oa_PWR	Float	Рассчитанная мощность, %	

ПИД-регулятор подключен на аналоговый выход, 0 – 10 В, а также присвоен диапазон 0-100% для дискретных органов (заслонка клапана-смесителя). В системе автоматического управления заслонкой клапана-смесителя системы есть текущее и заданное значение относительной влажности воздуха 70%, ПИД регулятор управляет заслонкой, чтобы текущее значение приблизить к заданному. Фирма Owen разработала программный модуль для своих программируемых реле ПР200, которому нами задаются значения на вход — это текущее значение и уставка и на выходе получаем управляющее воздействие на клапан в виде напряжения от 0 до 10 вольт.

Основным параметром, по которому контролировалось частичное подмешивание свежего воздуха путем открытия части патрубка рециркуляции клапана – смесителя, являлась относительная влажность отработавшего агента сушки.

Испытания работы системы рециркуляции агента сушки с системой автоматического управления заслонкой клапана – смесителя, представленного на рисунке 3.22, проводили следующим образом. Зерно загружали в камеру сушки, замерялась влажность зернового вороха, закрывался сдвижной зонт. В окне программы Simr ligh устанавливали $\varphi=70\%$, при этом заслонка клапана-смесителя автоматически

переводилась в положение I – заслонка закрыта. Запускали вентиляторы 1, 9 и теплогенератор 11 (рисунок 3.4). По мере выхода на заданную температур поворотная заслонка автоматически открывала часть площади патрубка рециркуляции для подмешивания свежего воздуха к части отработавшего агента сушки. Исследования проводились при нагреве агента сушки до 70°C.

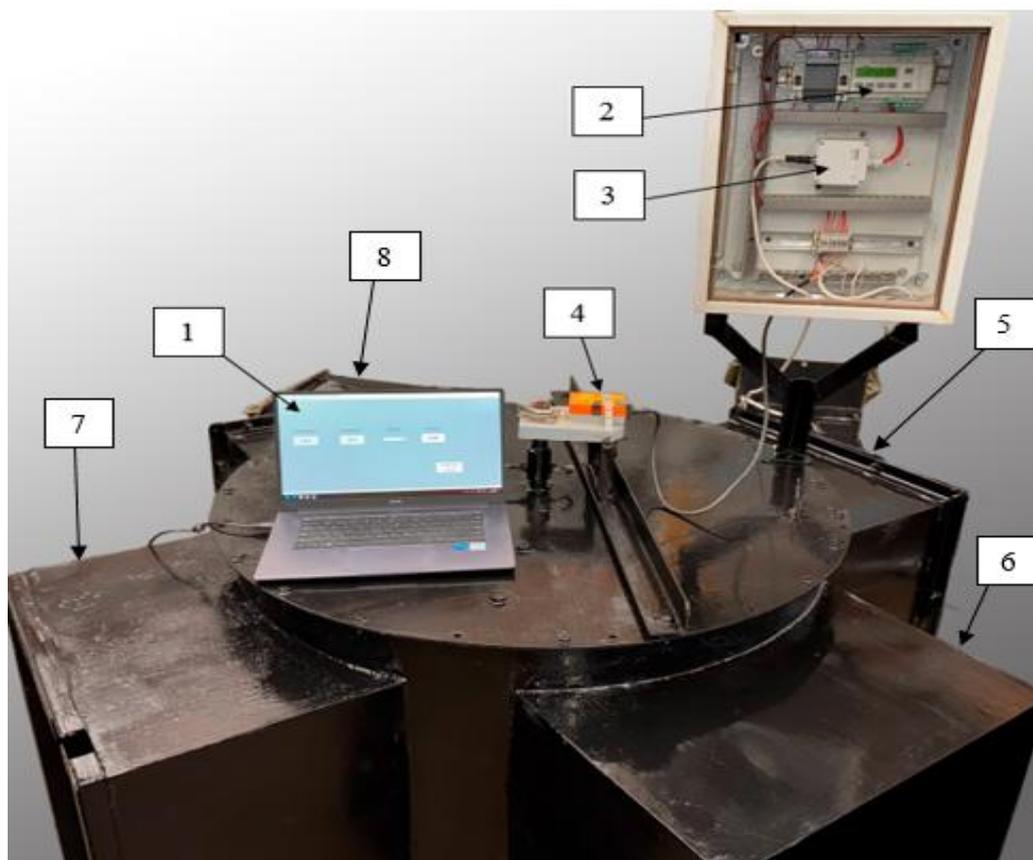


Рисунок 3.22 – Система автоматического управления поворотной заслонкой клапана-смесителя системы рециркуляции: 1 – монитор лицензионной программы SimpLight на ПК; 2 – ПР200 программируемое реле с дисплеем; 3 - электронный блок промышленного датчика - преобразователя влажности и температуры воздуха ПВТ110; 4 – электропривод без возвратной пружины Velimo GM24, установленный на ось поворотной 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

«Расход топлива замерялся методом отсечек при помощи напольных весов (рисунок 3.12). Расход электроэнергии на привод вентилятора замерялся при помощи трёхфазного электрического счетчика (рисунок 3.14). При достижении кондиционной влажности зернового вороха теплогенератор 1 выключали, в мониторе программы *Simp lighth* задавали значение $\varphi = 0$, заслонка клапана-смесителя автоматически переводилась в режим III – полной смены агента» [20]. Далее зерно охлаждали. «Температура отработавшего агента сушки при наименее энергозатратном режиме, составляла в среднем 43°C , она входит в теоретически определенный диапазон температур при трехкратном использовании теплоты отработавшего агента сушки» [21].

Окно программы *SimpLight* для управления и осуществления контроля параметров агента сушки представлено на рисунке 3.23

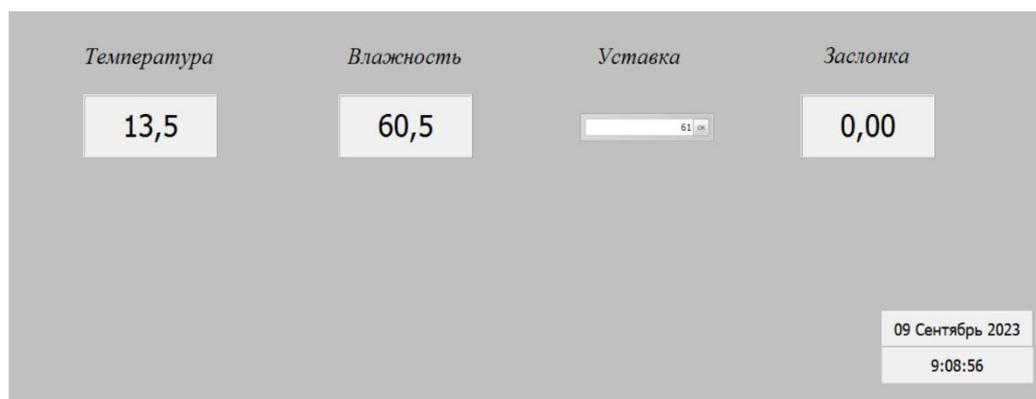


Рисунок 3.23 – Окно программы *SimpLight* для установки и контроля параметров агента сушки

«Модернизация системы автоматического управления заслонкой клапана смесителя возможна за счет расширения функциональности программируемого реле ОВЕН ПР200, работающего в сети RS-485 по протоколам Modbus RTU/Modbus ASCII в режиме Master или Slave, путем установки интерфейсной платы ПР-ИП485. Данная плата позволяет реле взаимодействовать с другими устройствами и системами, использующими этот стандарт связи, что позволит использовать систему автоматического управления заслонкой клапана-смесителя без компьютера» [21].

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты лабораторного исследования аэродинамических характеристик камеры сушки

Согласно методике, изложенной в разделе 3.5, был проведён однофакторный эксперимент, результаты представлены в таблице (приложение В).

Температура наружного воздуха $t_{н.в.}$ находилась в пределах 20,5...22,5°C, атмосферное давление $P_{атм} = 101,4$ кПа, влажность воздуха, $\varphi, = 89\%$. Потребляемая мощность электроэнергии, $N_{эл}$, составила 7,6 кВт·ч на режиме 90° – заслонки полностью закрыты, 7,1 кВт·ч на режиме 45° – заслонки открыты полностью, расход воздуха на входе в распределяющий воздухоподводящий патрубок, Q_n – 25452 м³/ч.

Графическое отображение изменения расхода воздуха в зависимости от положения заслонок было выполнено в редакторе электронных таблиц MS Excel и представлены на рисунках 4.2...4.4.



Рисунок 4.1 – Транспортировка опытного образца устройства с кафедры технических систем в АПК на опытное поле ФГБОУ ВО Костромской ГСХА

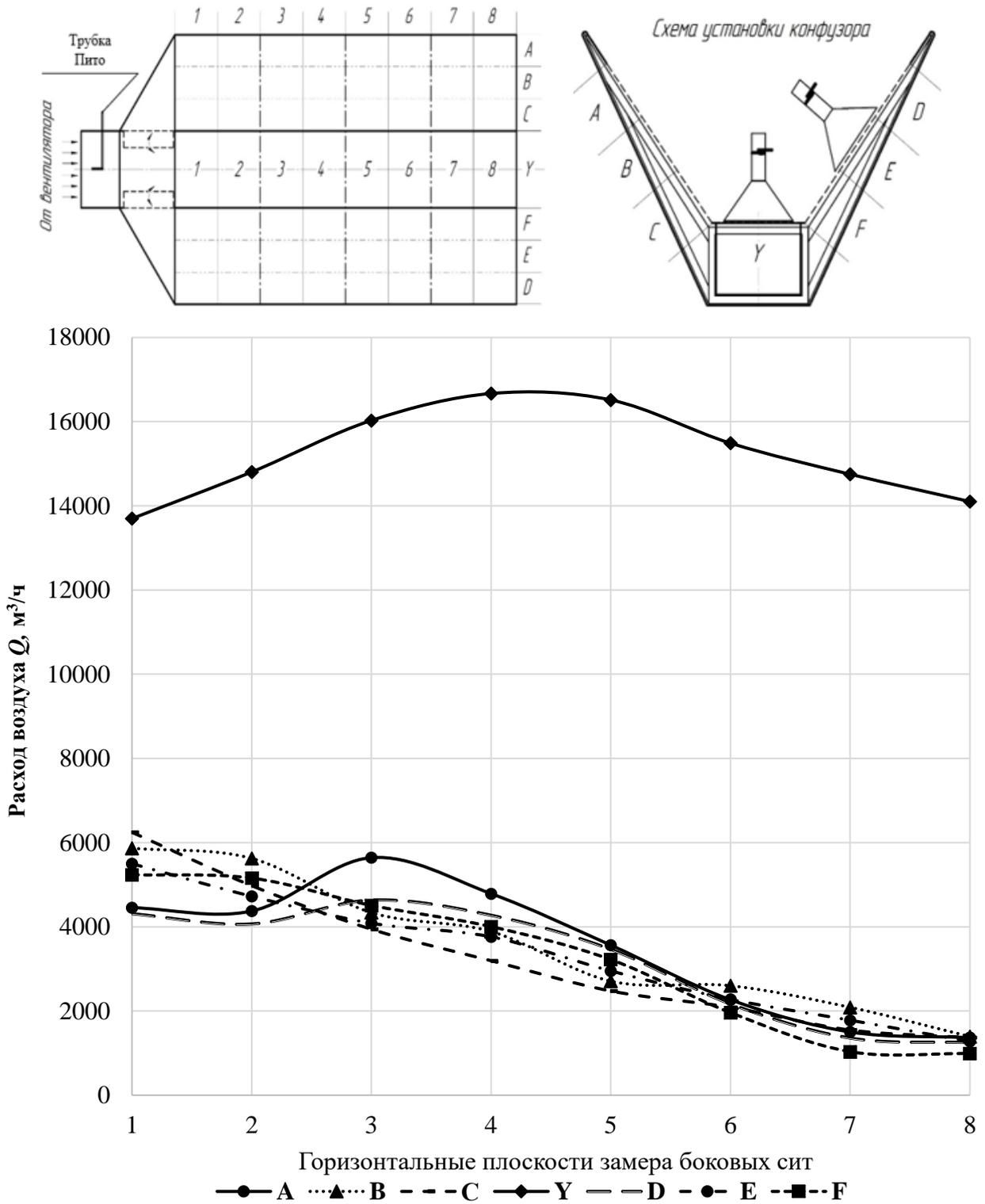


Рисунок 4.2 – Расход воздуха на поверхности тканевых сит боковых воздухоподводящих полостей и перфорированной грузонесущей перегородки при полностью открытых заслонках

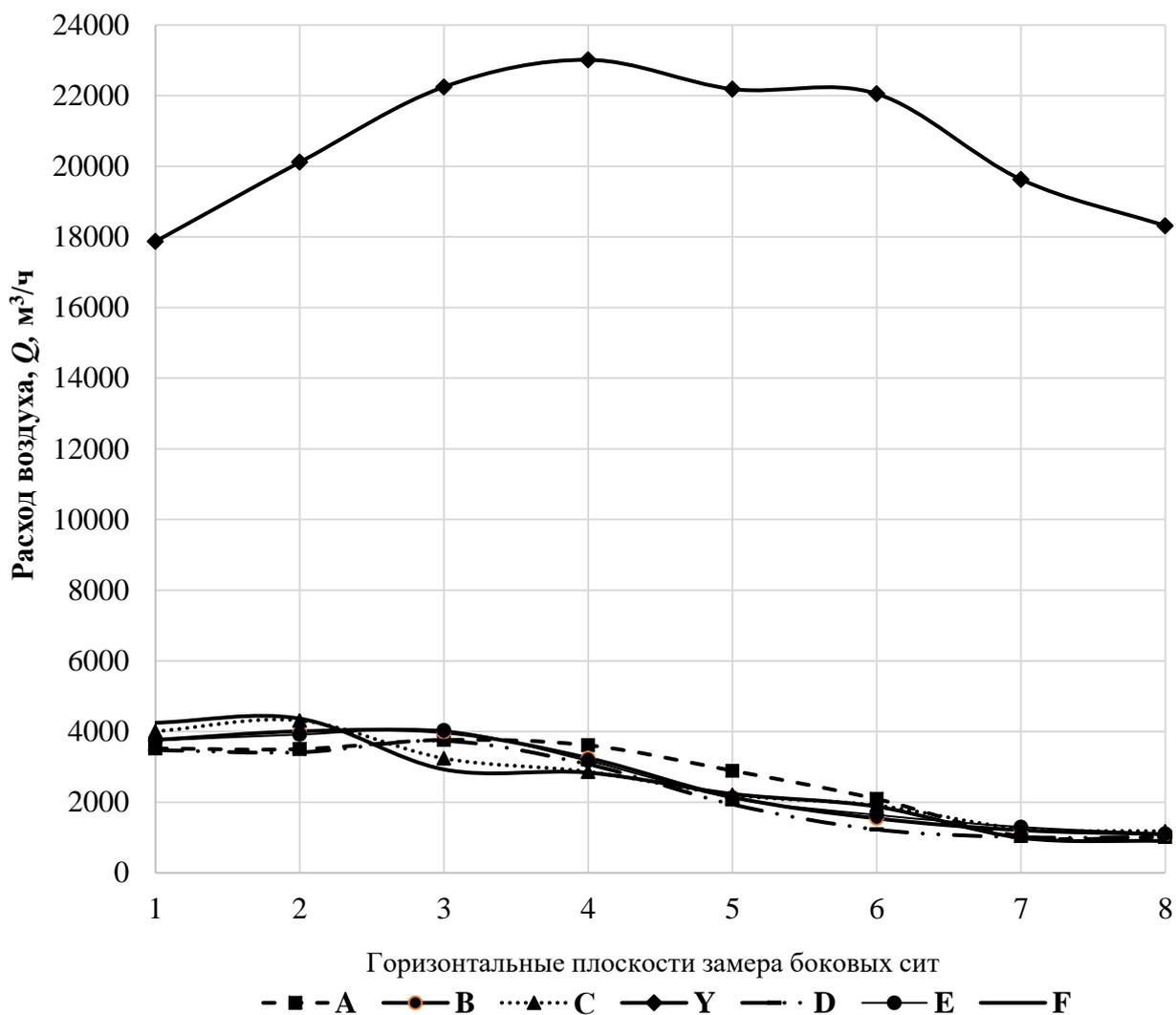
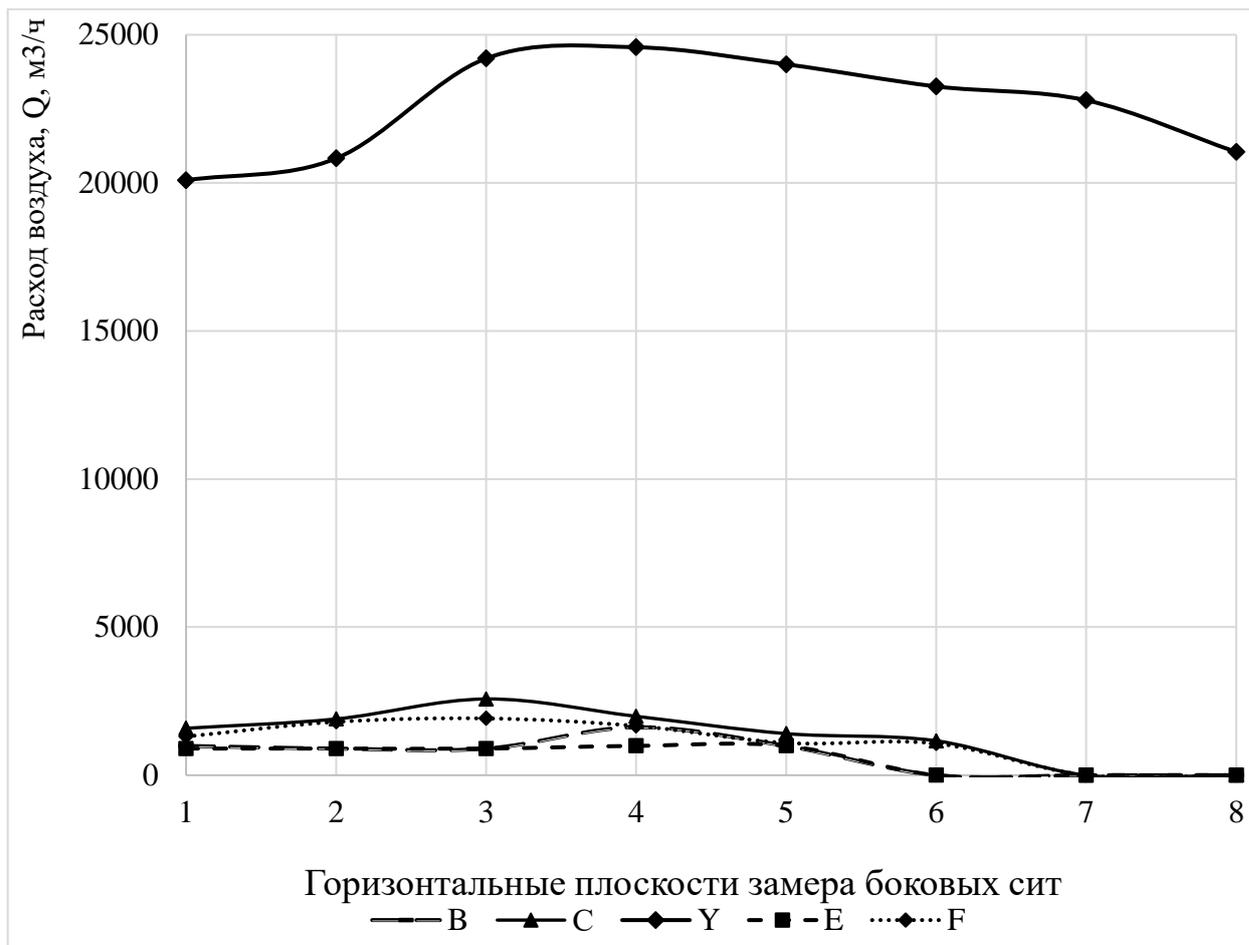


Рисунок 4.3 – Расход воздуха на поверхности тканевых сит боковых воздухоподводящих полостей и перфорированной грузонесущей перегородки при среднем положении заслонок

На графиках, представленных на рисунках 4.1 и 4.2, расход воздуха, проходящего через перфорированную грузонесущую перегородку в плоскости Y 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.



Плоскости замера А и D не показаны по причине нулевых значений расхода воздуха

Рисунок 4.4 – Расход воздуха на поверхности тканевых сит боковых воздухоподводящих полостей и перфорированной грузонесущей перегородки при закрытых заслонках

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. Снижения расхода воздуха на начальных участках боковых сит не наблюдается.

4.2 Результаты исследования влияния системы рециркуляции на распределение агента сушки в заполненной зерном сушильной камере

В соответствии с принятой программой, исследования проведены на опытном образце аэродинамического устройства для сушки зерна (рисунок 3.3) в ЗАО «Шунга» Костромской области. Камеру сушки заполняли яровым ячменем с начальной средней влажностью 22% (рисунок 4.8). Исследовалась равномерность распределения воздушного потока через материал с работающей системой рециркуляции отработавшего агента сушки и без нее при разных положениях поворотной заслонки клапана-смесителя. Результаты исследования приведены в приложении Д.



Рисунок 4.5 – Транспортировка аэродинамического устройства для сушки зерна в ЗАО «Шунга» Костромской области

Временные затраты на перемещение разработанного устройства из Костромской ГСХА в ЗАО «Шунга» составили: разборка и подготовка – 8 часов; погрузка и транспортировка – 4 часа; сборка и тестовый запуск – 16 часов.

Согласно методике, изложенной в разделе 3.6, был проведён однофакторный эксперимент, результаты представлены в приложении Д.



Рисунок 4.6 – Сборка блоков аэродинамического устройства для сушки зерна в ЗАО «Шунга» Костромской области

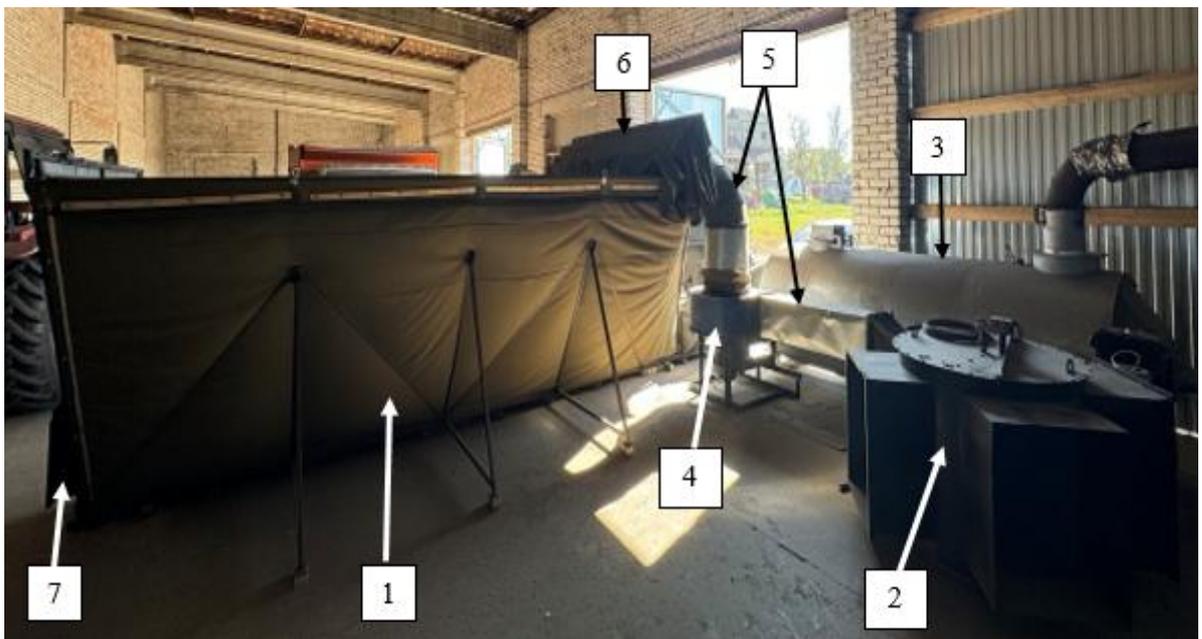


Рисунок 4.7 – Аэродинамическое устройство для сушки зерна, оснащенное разработанной системой рециркуляции агента сушки, в ЗАО «Шунга» Костромской области: 1 – камера сушки; 2 – клапан-смеситель системы рециркуляции; 3 – теплогенератор; 4 – вентилятор аспиратор системы рециркуляции; 5 – воздуховоды; 6 – сдвижной зонт камеры сушки системы рециркуляции



Рисунок 4.8 – Загрузка камеры сушки аэродинамического устройства для сушки зерна яровым ячменем

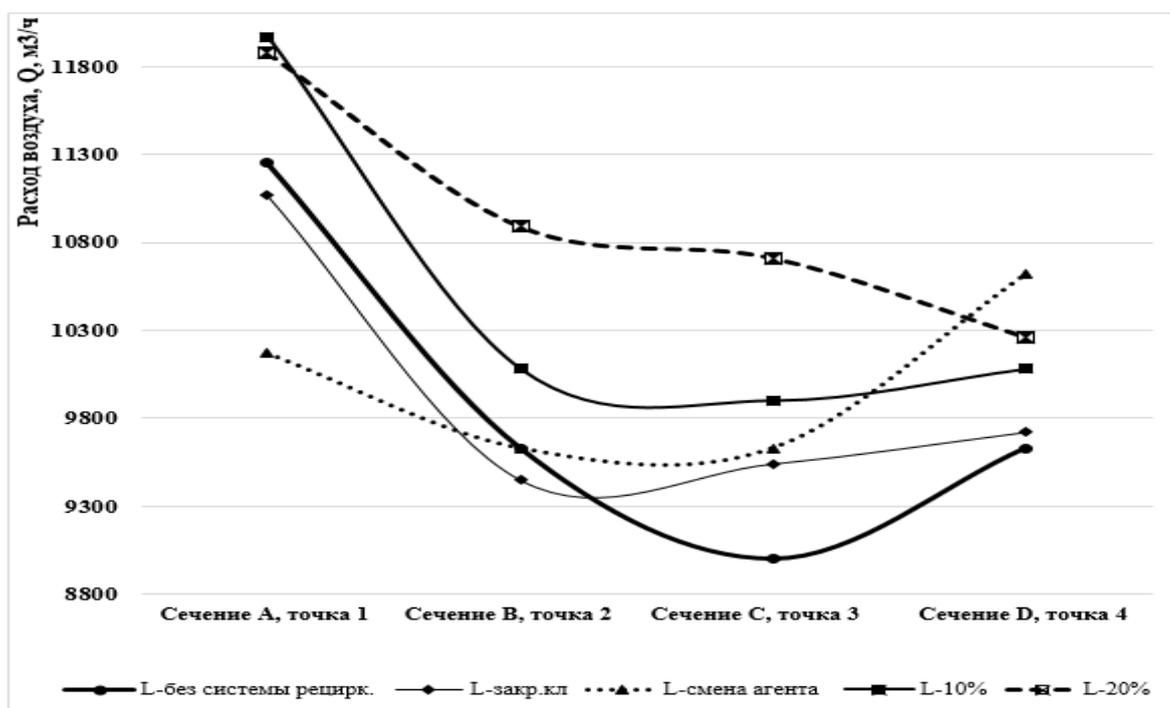


Рисунок 4.9 – Расход отработавшего агента сушки по длине камеры сушки на поверхности ячменя в местах замеров 1, 2, 3, 4 сечений А, В, С, D при различных режимах работы клапана-смесителя

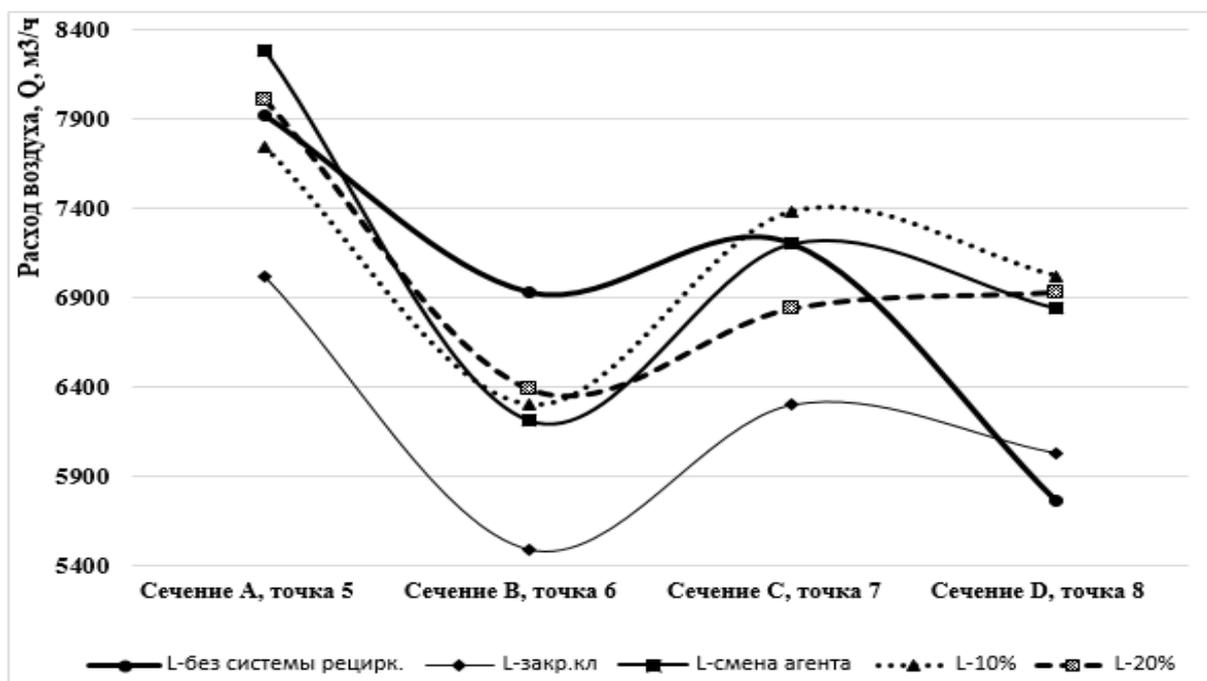


Рисунок 4.10 – Расход отработавшего агента сушки по длине камеры сушки на поверхности ячменя в местах замеров 5, 6, 7, 8 сечений А, В, С, D при различных режимах работы клапана-смесителя

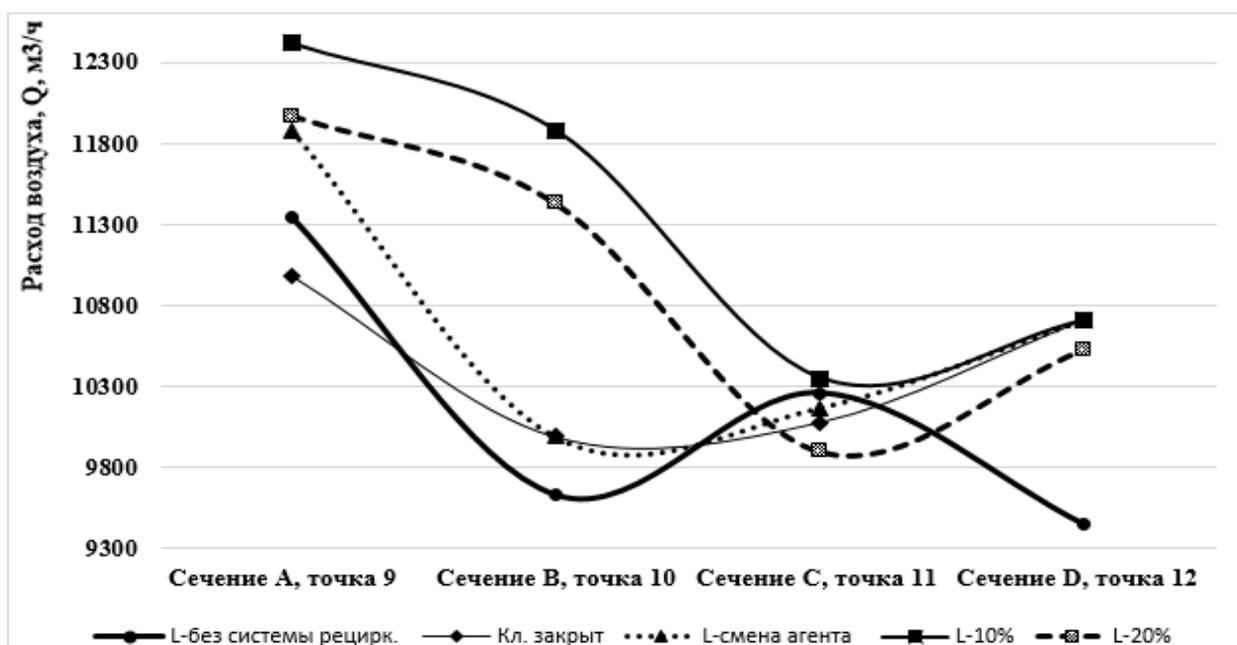


Рисунок 4.11 – Расход отработавшего агента сушки по длине камеры сушки на поверхности ячменя в местах замеров 9, 10, 11, 12 сечений А, В, С, D при различных режимах работы клапана-смесителя

Расходы воздуха на всех режимах выше в зоне боковых сит в местах замеров 1–4 и 8–12 сечений А, В, С, D (рисунок 4.9...4.11), это обуславливается меньшим аэродинамическим сопротивлением. Коэффициент живого сечения боковых сит – 46%, а грузонесущей перегородки – 9 %. Толщина продуваемого зернового слоя на грузонесущей перегородки варьируется от 1500 мм до 1950 мм, а в зоне боковых сит она до 2 раз меньше.

Таблица 4.1 – Влияние режимов работы и системы рециркуляции на равномерность распределения расхода отработанного агента сушки по длине камеры сушки с зерном [20]

Параметры	Режимы работы передвижного 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 патрубков рециркуляции клапана-смесителя	Открытие 20% площади патрубков 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 (таблица 4.1) меньше, чем при использовании конструкции сушилки без системы рециркуляции агента сушки. Стабильность расхода воздуха по длине аэродинамического устройства способствует обеспечиванию одинаковой скорости выхода струй воздуха из щелей грузонесущей перегородки, и как, следствие, стабильности перемещения зернового вороха вдоль аэродинамического устройства при его разгрузке» [20].

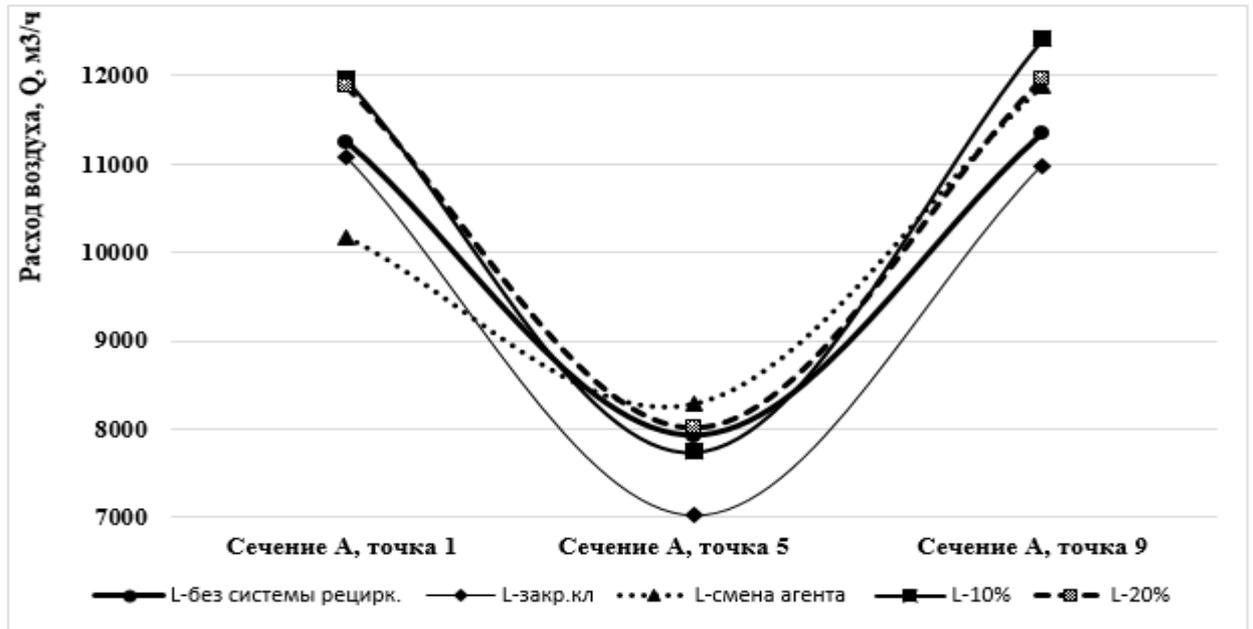


Рисунок 4.12 – Расход отработавшего агента сушки по ширине камеры сушки на поверхности ячменя в местах замеров 1, 5, 9 сечения А, при различных режимах работы клапана-смесителя

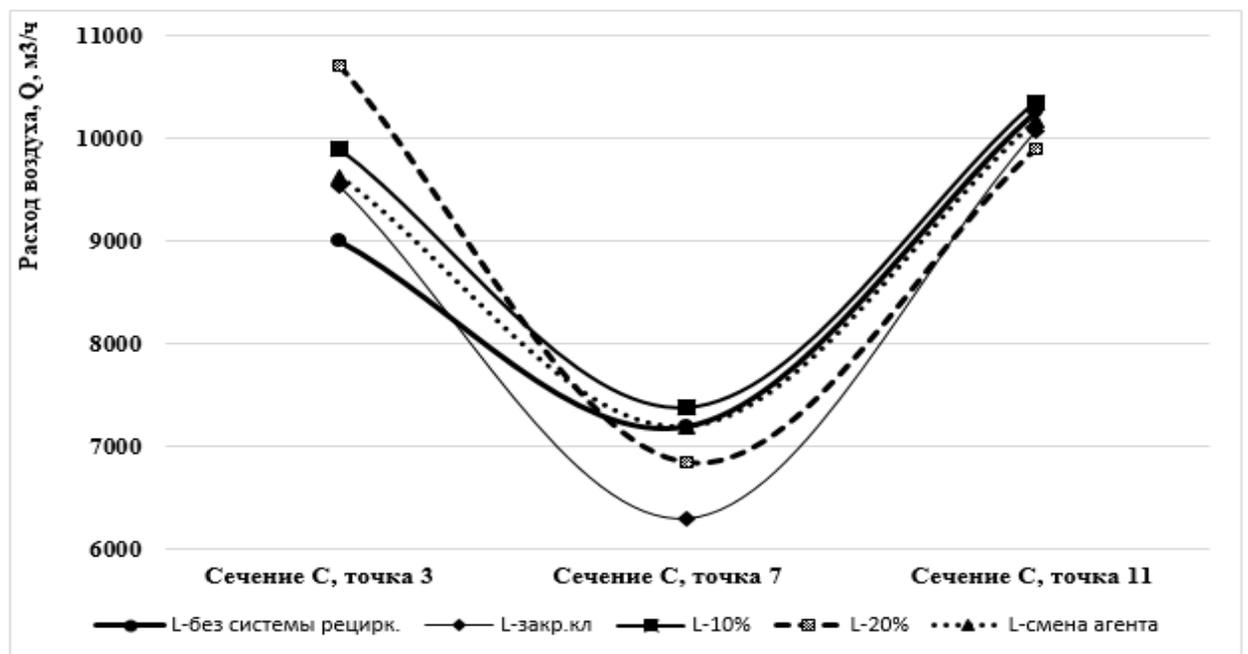


Рисунок 4.13 – Расход отработавшего агента сушки по ширине камеры сушки на поверхности ячменя в местах замеров 2, 6, 10 сечения В, при различных режимах работы клапана-смесителя

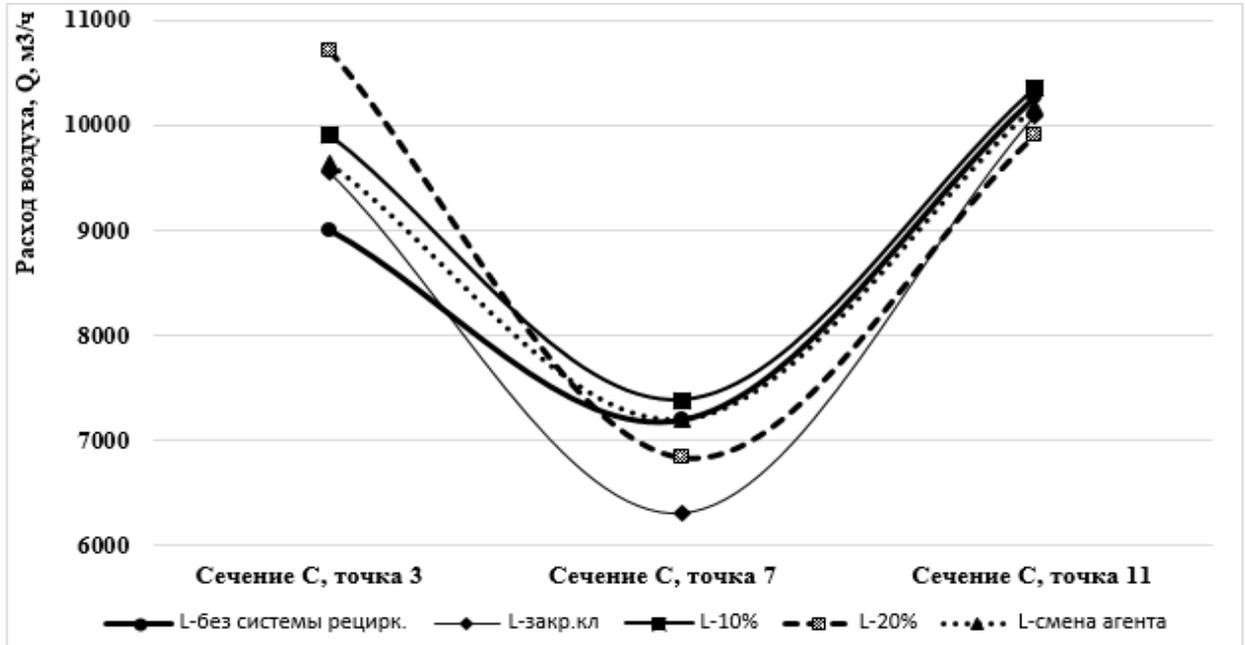


Рисунок 4.14 –Расход отработавшего агента сушки по ширине камеры сушки на поверхности ячменя в местах замеров 3, 7, 11 сечения С, при различных режимах работы клапана-смесителя

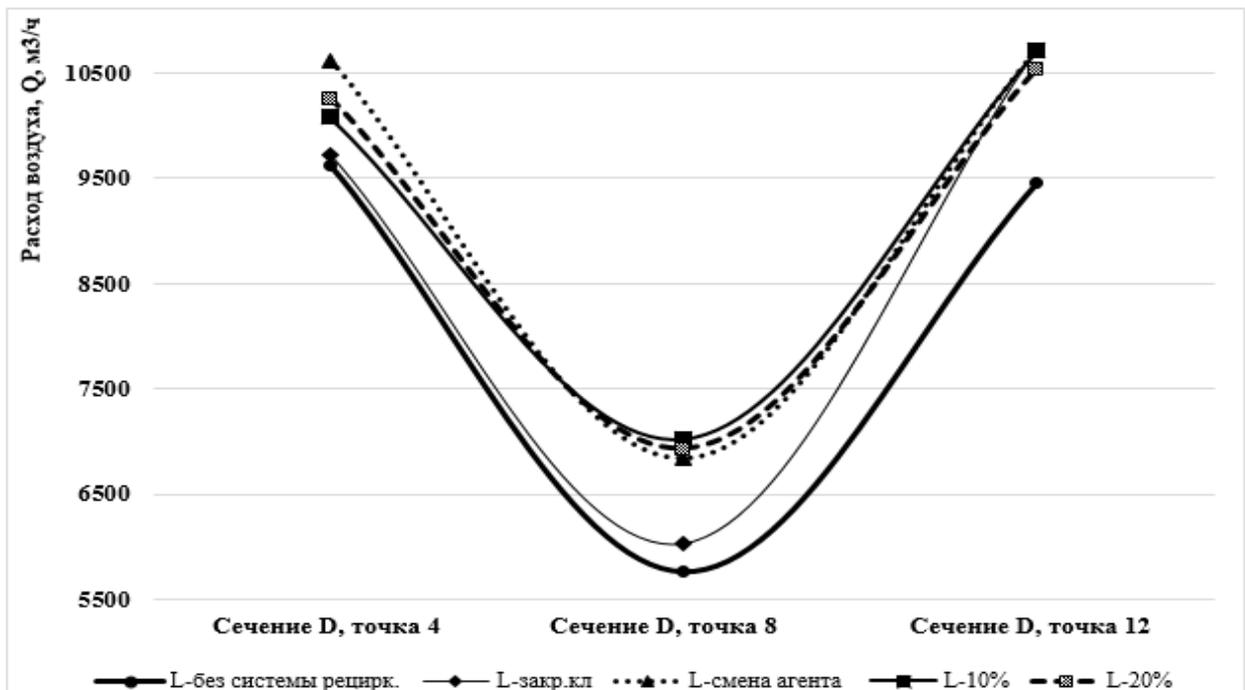


Рисунок 4.15 –Расход отработавшего агента сушки по ширине камеры сушки на поверхности ячменя в местах замеров 4, 8, 12 сечения D, при различных режимах работы клапана-смесителя

Таблица 4.2 – Влияние режимов работы и системы рециркуляции на распределение расхода отработанного агента по ширине камеры сушки с зерном [20]

Режимы работы передвижного 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			
	А	В	С	Д
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 (таблица 4.2). 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.

Система рециркуляции отработавшего агента сушки в режиме работы частичного подмешивания свежего воздуха – открытие 10 % площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя в сравнении с конструкцией сушиллки без системы рециркуляции увеличивает расход воздуха и скорость фильтрации через материал на 7,22 % и составляет соответственно $Q = 9652,5$ м³/ч и $V = 0,1915$ м/с (рисунок 4.16, 4.17)» [20].

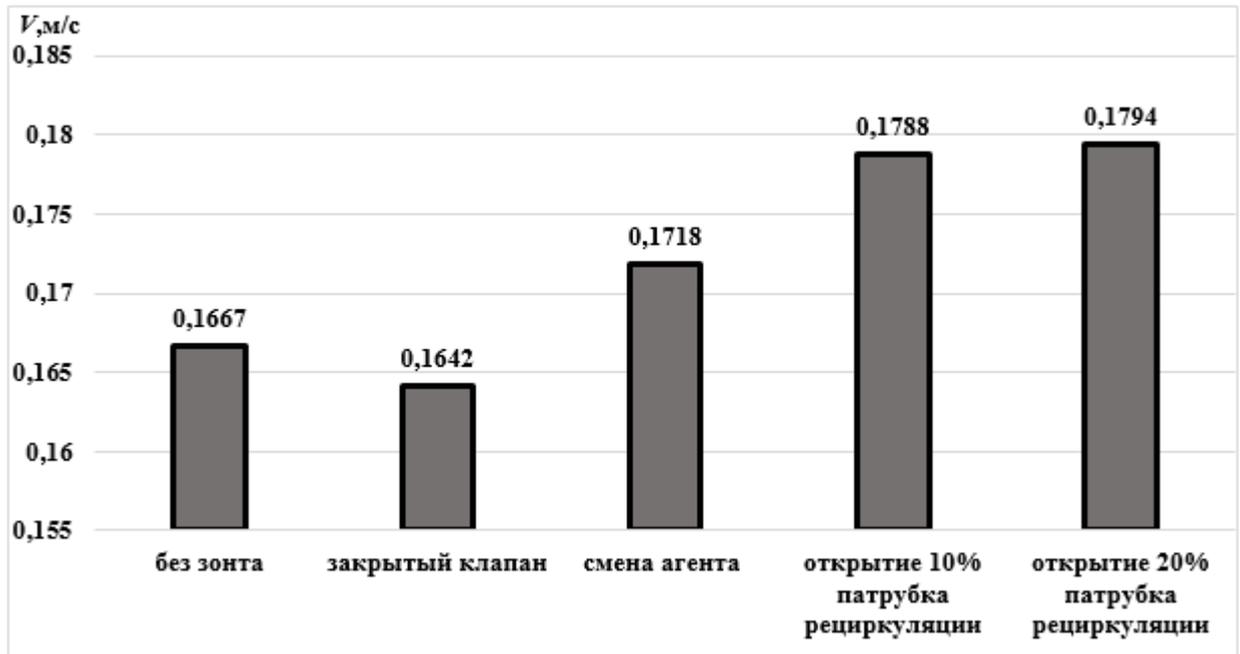


Рисунок 4.16 – Средняя скорость фильтрации на поверхности зерна в различных режимах работы системы рециркуляции

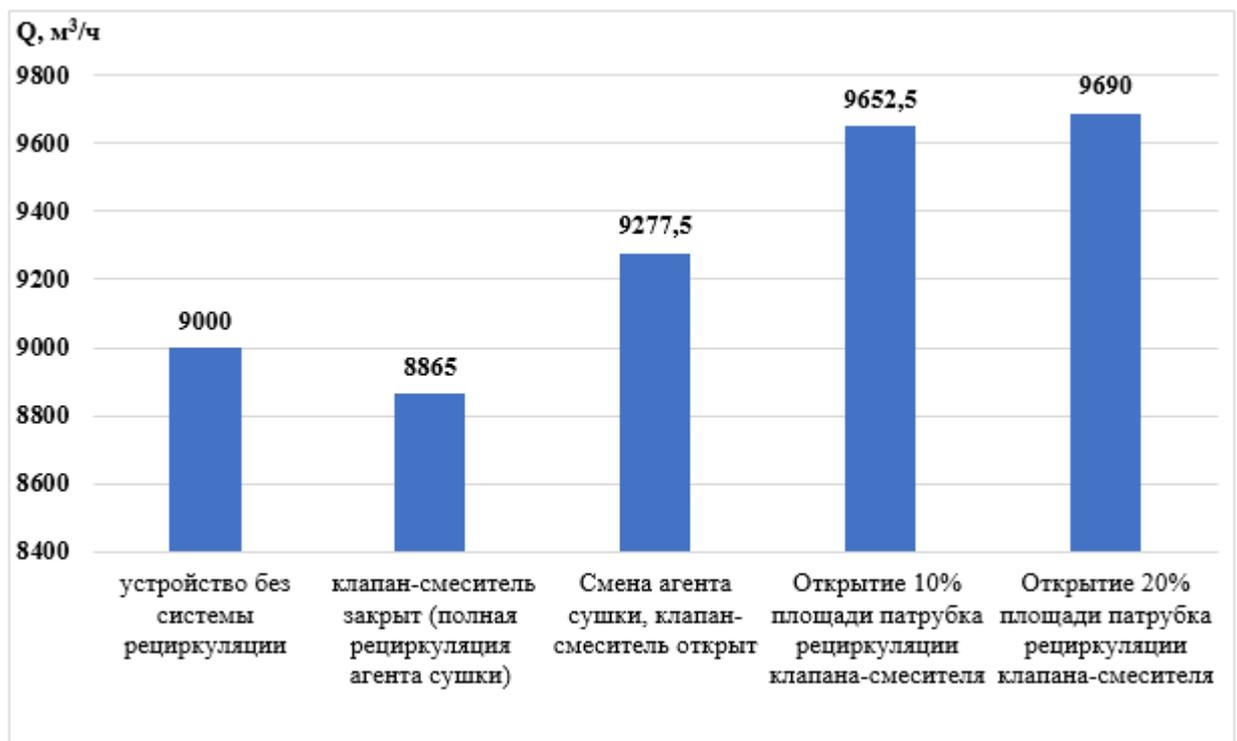


Рисунок 4.17 – Средний расход агента сушки в различных режимах работы системы рециркуляции

«Открытие 20 % площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя увеличивает расход воздуха и скорость фильтрации через материал на 7,67 % и составляет соответственно $Q = 9690 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $V = 0,1923 \text{ м/с}$ » [20].

4.3 Результаты производственных испытаний аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащенного системой рециркуляции агента сушки

Температура наружного воздуха $t_{н.в.}$ при проведении исследования колебалась от 18 до 23,2°C; влажность воздуха $\varphi_{н.в.}$ – от 66,7 до 74,1%; расход воздуха на входе в распределяющий воздухоподводящий патрубок, Q_n – 13598 м³/ч; начальная влажность поступившей партии семян ячменя w_3^H – от 22 до 23%; начальная, атмосферное давление воздуха $P_{атм}$ – 101,9 кПа. Температура нагрева агента сушки, t_a , устанавливалась на уровне 100°C. Средняя температура отработанного агента сушки T_2 – 42...47°C. Температура нагрева семян во время сушки t_2 находилась в пределах 42±3°C. Потребляемая мощность электроэнергии, $N_{эл.}$, составила 14,5 кВт·ч.

В результате проведенных экспериментов во время сушки ячменя были получены данные выходных величин и подсчитаны средние их значения, которые приведены (приложение Е).

По результатам проведения производственных испытаний построены графики зависимостей температуры отработанного агента сушки в клапане-смесителе, относительной влажности воздуха в клапане смесителе, удельного расхода на привод вентилятора и удельного расхода теплоты на килограмм испаренной влаги из зерна от режима работы клапана-смесителя (рисунок 4.18 – 4.21).

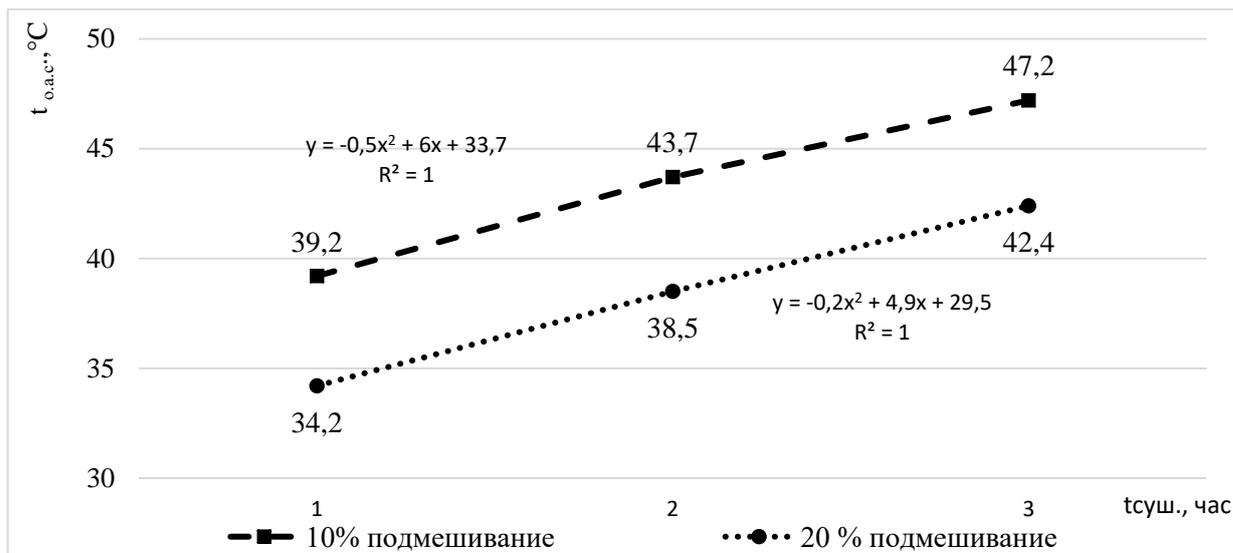


Рисунок 4.18 – Влияние подмешивания атмосферного воздуха на изменение температуры отработанного агента сушки в клапане-смесителе

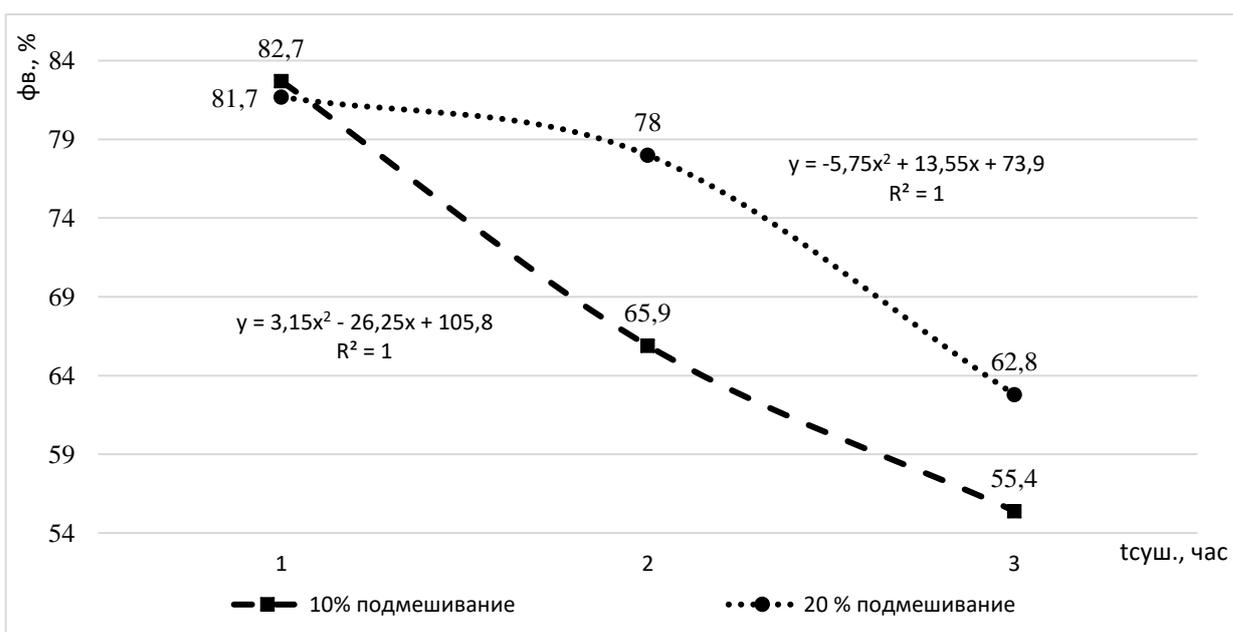


Рисунок 4.19 – Влияние подмешивания атмосферного воздуха на изменение относительной влажности агента сушки в клапане смесителе

Начальная относительная влажность воздуха ϕ , при открытии 10 % площади патрубка рециркуляции составила 75,9 %, при открытии 20 % площади патрубка рециркуляции – 66,7 %

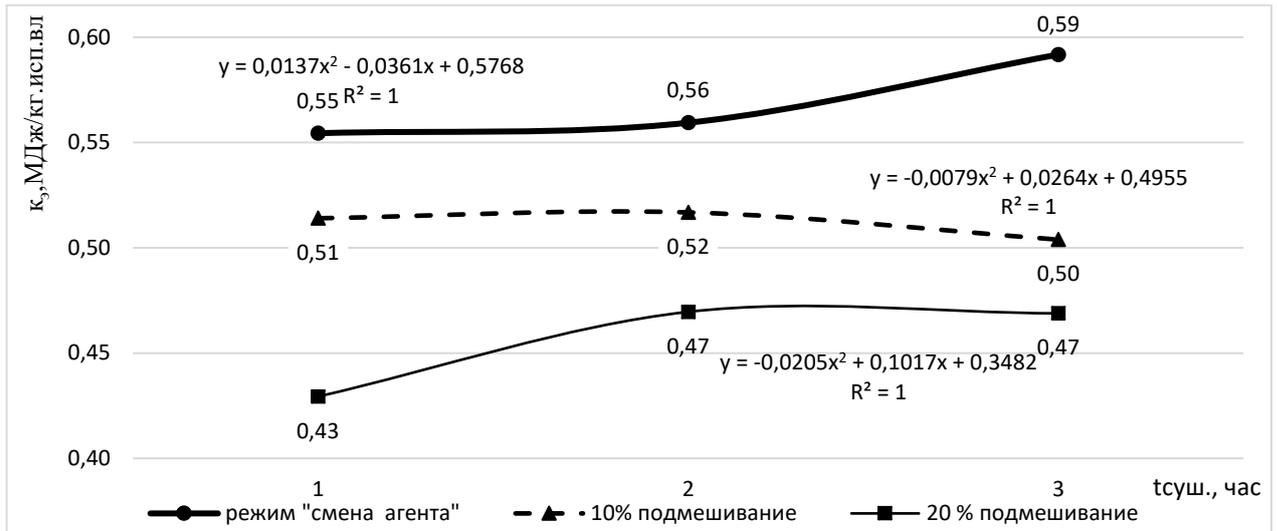


Рисунок 4.20 – Влияние подмешивания атмосферного воздуха на общий расход энергии на привод вентиляторов

«Влияние режимов работы аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащенного разработанной системой рециркуляции агента сушки на интегральный расход энергии приведено на рисунке 4.21» [20].

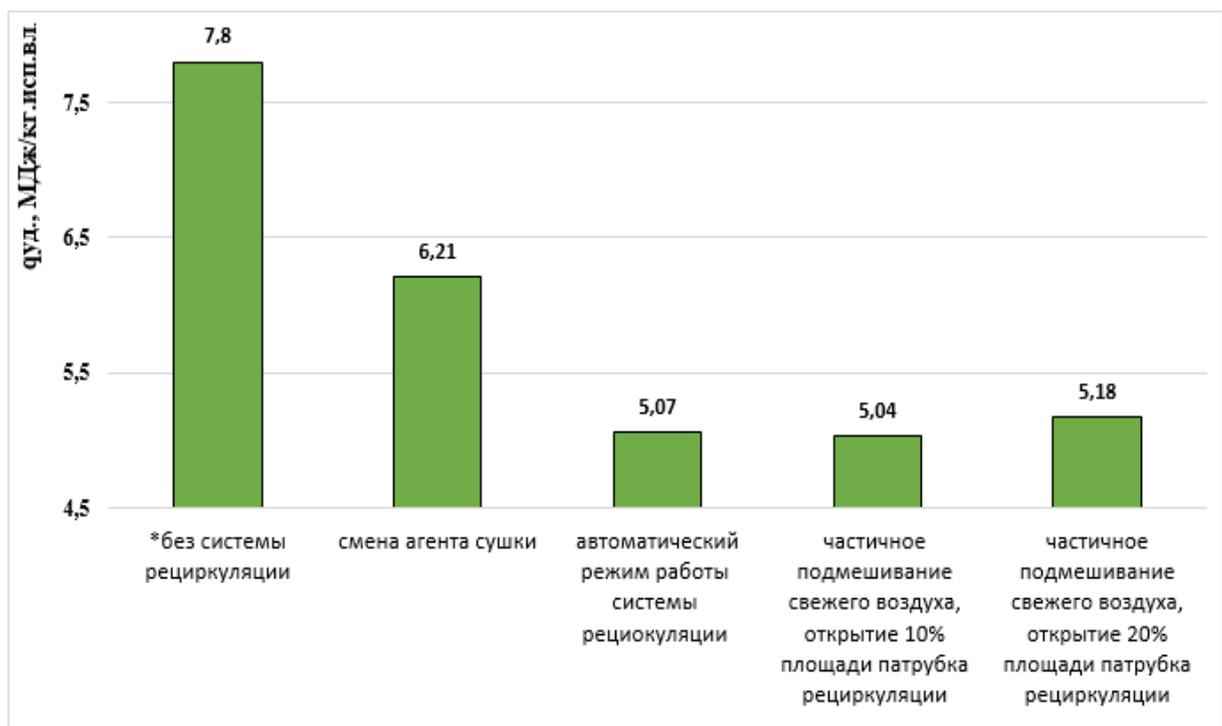


Рисунок 4.21 – Интегральный расход энергии на сушку зерна в зависимости от режимов работы системы рециркуляции агента сушки

«Нагрев агента сушки до 100 °С в исследуемых режимах работы системы рециркуляции отработавшего агента сушки позволяет добиться максимальной энергоэффективности. При сушке зерна в режиме «частичной рециркуляции», при открытии 10% площади патрубка рециркуляции температура агента сушки на выходе из камеры сушки находилась в пределах 39,2...47,2 °С, что соответствует наиболее эффективному теоретически определенному режиму, четырех-пятикратного использования теплоты отработавшего агента сушки. При открытии 20 % площади патрубка рециркуляции, температура агента сушки на выходе из сушилки, находилась в пределах 36,2...43,5 °С, что соответствует двух–трехкратному использованию теплоты отработавшего агента сушки.

Интегральный расход энергии на 1 кг испаренной влаги из зерна в режиме работы системы рециркуляции отработавшего агента сушки - «смена агента сушки» составил 6,21 МДж/кг.исп.вл. Открытие 10 % площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя в режиме работы системы рециркуляции агента сушки - «частичное подмешивание свежего воздуха» позволяет сократить интегральный расход энергии на 18,84 %, который составил 5,04 МДж/кг.исп.вл. При режиме работы системы рециркуляции отработавшего агента сушки - «частичное подмешивание свежего воздуха» открытие 20 % площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя снижает интегральный расход энергии на 16,59 % и составил 5,18 МДж/кг.исп.вл.» [20].

Качественные показатели ярового ячменя на фураж после его сушки в разработанном устройстве в ЗАО «Шунга» по данным ярославской лаборатории «ЯРВЕТ» от 01.10.2024 № 24111831 (приложение И) удовлетворительные и имеют следующие значения: влажность 10,21 %; сухое вещество 89,79 %; крахмал 53,05% СВ; жир 2,32% СВ; сырой протеин 12,13 % СВ; сырая клетчатка 7,14 % СВ; аНДК 19,12 % СВ; аНДК по органическому веществу 17,98%; КДК 9,12%; перевариваемость аНДК по органическому веществу за 12 ч, 15,36%; перевариваемость аНДК

по органическому веществу за 72 ч, 57,44 %; перевариваемость аНДК по органическому веществу за 120 ч, 58,63 %; зола 4,31 % СВ; переваримые питательные вещества 77,81 % СВ; обменная энергия 11,13 МДж/кг СВ; чистая энергия лактации 7,04 МДж/кг СВ; чистая энергия на привес 5,76 МДж/кг СВ; чистая энергия жизнедеятельности 8,51 МДж/кг СВ; VEM 1019,69; БЭВ концентраты 741,03 г/кг СВ; перевариваемый протеин (по ВНИИ кормов) 96,36 г/кг.

По данным производственных испытаний разработанного устройства на опытном поле Костромской ГСХА, система рециркуляции агента сушки аэродинамического устройства для сушки зерна работающая в автоматическом режиме при нагреве агента до 70 ° позволяет снизить энергозатраты до значения $q_{уд} = 5,07$ МДж/кг.исп.вл. Качественные показатели пшеницы на фураж удовлетворительные, по данным кафедры земледелия, растениеводства и селекции (приложение Л) после сушки зерновой ворох имел следующие значения: влажность 13,1%, зерновая примесь 1,9 %, вредная примесь 0%, зараженность и загрязненность вредителями 0 %, содержание клейковины 21 %, белка 12,87 %, натура 722 г/л, сорная примесь 0,1 %, стекловидность 48 %, число падения 274 с.

Использование системы рециркуляции агента сушки позволяет снизить энергозатраты на сушку зерна до 35 %.

Выводы по разделу

1. 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.

2. Скорость фильтрации 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 и полной рециркуляции до 0,192 м/с при открытии 20% патрубка рециркуляции клапана-смесителя.

4. Использование системы рециркуляции значительно снижает интегральный расход энергии – до 35 % с 7,8 до 5,04 МДж/кг.исп.вл. Работа аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащенного разработанной системой рециркуляции агента сушки наиболее эффективна в режиме частичной рециркуляции агента сушки. Открытие 10 – 20 % площади патрубка рециркуляции клапана – смесителя при сравнении с режимом смены агента сушки снижает интегральный расход энергии на 18,84...16,59 % при удовлетворительных качественных показателях зерна после сушки.

5. При работе аэродинамического устройства для сушки зерна с системой рециркуляции агента сушки, работающей в автоматическом режиме, интегральный расход энергии составил 5,07 МДж/кг.исп.вл.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Для определения экономической эффективности разработанного аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащённого системой рециркуляции агента сушки, произведено его сравнение с приемным устройством с аэрожелобом УПА-15. Экономическая оценка была проведена по методическим рекомендациям [11; 14; 99]. Результаты расчетов представлены в приложении К.

5.1 Стоимость изготовления устройства

Стоимость изготовления устройства в новом варианте определяли по формуле:

$$C_{\text{иу}} = C_{\text{ПД}} + C_{\text{ИД}} + C_{\text{МР}}, \quad (5.1)$$

где $C_{\text{ПД}}$ – стоимость покупных деталей, руб.;

$C_{\text{ИД}}$ – стоимость изготовленных деталей, руб.;

$C_{\text{МР}}$ – стоимость монтажных работ, руб.

Стоимость изготовленных деталей, определяли по формуле:

$$C_{\text{ИД}} = C_{\text{М}} + C_{\text{Р}}, \quad (5.2)$$

где $C_{\text{М}}$ – стоимость материала, руб.;

$C_{\text{Р}}$ – стоимость работ, руб.

Стоимость покупных деталей и материалов представлена в таблице 5.1, 5.2.

Таблица 5.1 – Стоимость покупных деталей

Наименование деталей	Количество, шт.	Стоимость единицы, руб.	Всего, руб.
Болт 12 X 80	30	14,7	441
Болт 8 X 50	60	5,7	342
Гайка М12	30	13,1	393
Гайка М 8	60	6	360
Шайба 12Л	30	8	240
Шайба 8Л	60	4,5	270
Итого			2046

Таблица 5.2 – Стоимость покупных материалов

Наименование материала	Количество, шт.	Стоимость, единицы, руб.	Всего, руб.
Ткань Оксфорд 600 D PU, м.	75	213	15975
Ткань капроновая для сит 24,7 пч 150/122 265 МКМ, м.	16	726	11616
Тесьма 5 см (2,5 т.), м.	96	40	3840
Тесьма 2 см (1 т.), м.	36	30	1080
Нитки 50 К, шт.	10	35	350
Уголок 25×25, м.	6	175	1050
Уголок 40×40, м.	20	310	6200
Уголок 50×50, м.	1,5	490	735
Уголок 75×75, м.	6	715	4290
Труба профильная (прямо.) 40×20 мм, м	30	155	4650
Труба профильная (прямо.) 40×25 мм, м	22	185	4070
Труба профильная (квадр.) 60×60 мм, м	12	360	4320
Труба профильная (квадр.) 25×25 мм, м	10	128	1280
Труба круглая мет. D 32 мм, м	30	412	12360
Полоса 25×4 мм, м	12	68	816
Лист, оцинкованный толщина 0,4 мм, 1250x2500 мм	4	544	2176
Итого			74808

*Цены приняты на основе данных прайс листов - Интернет на 20.05.2025 г.

Стоимость работ [82]:

$$C_{\text{PI}} = t \cdot T_{\text{ч}} \cdot k_{\text{д}} \cdot k_{\text{о}}, \quad (5.3)$$

где t – время работы, ч.;

$T_{\text{ч}}$ – часовая тарифная ставка, руб./ч., цены приняты на основе данных прайс листов – Интернет на 20.05.2025 г.

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат, $k_{\text{д}}=1,6$;

$k_{\text{о}}$ – коэффициент отчислений в социальные фонды, $k_{\text{о}}=1,302$.

Балансовая стоимость устройства в проектом варианте (K_H^{IP}) включает так же затраты на дополнительное оборудование:

$$K_H^{\text{IP}} = C_{\text{иу}} + C_{\text{до}} \quad (5.4)$$

где $C_{\text{до}}$ – затраты на дополнительное оборудование, руб.

Таблица 5.3 – Стоимость дополнительного оборудования

Наименование оборудования	Количество, шт.	Стоимость единицы, руб.	Всего, руб.
Промышленные вентиляторы среднего давления ВР 9-55 №10	2	274000	548000
Топочный блок RIR ТБ-0,75 ТО косвенного нагрева	1	675000	675000
Зернометатель ТСШ–150 Т	1	147477	148000
Золоуловитель ЗУ 1-2	1	58000	58000
Клапан-смеситель	1	72000	72000
Электропривод без возвратной пружины Belimo GM 24	1	25000	25000
ПВТ110 датчик влажности и температуры воздуха	1	14340	14340
Итого			1555540

*Цены приняты на основе данных прайс листов - Интернет на 20.05.2025 г.

Затраты на изготовление устройства аэродинамического устройства для сушки зерна с системой рециркуляции агента сушки составляет 181847,7 руб.

Для определения эксплуатационных издержек рассчитали балансовую стоимость $K_H^{ПП}$, аэродинамического устройства для сушки зерна, которая составляет 1737387,7 руб.

Балансовая стоимость базового образца $K_B^{ПП}$, приемного устройства с аэрожёлбом УПА-15 составляет 2098000 руб.

В соответствии с методикой описанной в разделе 2.1, провели расчет комплексного показателя совершенства конструкции зерновой сушилки, для аэродинамического устройства для сушки зерна, K_p , (МДж · т · ч²) / (пл.т · кг.исп.вл.):

$$K_p = M_{уд} \cdot Q, \quad (5.5)$$

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

Q – удельный расход теплоты, (МДж·ч)/кг.исп.вл., (исходя из результатов представленных в разделе 4.3, принимает 5,04 МДж/кг.исп.вл.

Удельная металлоёмкость, $M_{уд}$, (т·ч) / пл. т рассчитали по формуле:

$$M_{уд} = \frac{m}{A}, \quad (5.6)$$

где m – масса сушилки, т, (принимает 1 т);

A – производительность сушилки, пл.т /ч (исходя из результатов представленных в разделе 4.3, принимает 4,09 пл.т /ч).

В результате расчета комплексный показатель совершенства конструкции зерновой сушилки аэродинамического устройства для сушки зерна, получили K_p – 1,23 (МДж · т · ч²) / (пл.т · кг.исп.вл.).

5.2 Эксплуатационные издержки

Определение эксплуатационных издержек в проектном и базовом вариантах:

$$И_{\text{Э}} = Z_{\text{П}} + A + P + Z_{\text{Э}} + Z_{\text{Т}} + Z_{\text{ПР}}, \quad (5.7)$$

где $Z_{\text{П}}$ – затраты на оплату труда обслуживающего персонала, руб.;

A – отчисления на амортизацию, руб.;

P – отчисления на ремонт и техническое обслуживание, руб.;

$Z_{\text{Э}}$ – затраты на электроэнергию, руб.;

$Z_{\text{Т}}$ – затраты на топливо, руб.;

$Z_{\text{ПР}}$ – прочие затраты, руб.

Затраты на оплату труда обслуживающего персонала:

$$Z_{\text{П}} = t \cdot \tau \cdot k_{\text{д}} \cdot K_{\text{о}}, \quad (5.8)$$

где t – время работы, час.;

τ – часовая тарифная ставка обслуживающего персонала, руб./ч;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат;

$K_{\text{о}}$ – коэффициент, учитывающий отчисления в социальные фонды.

Время работы сушиллки [86]:

$$t = \frac{B_3}{W_n}, \quad (5.9)$$

где W_n – паспортная производительность, пл. т / час;

B_3 – объем сушки зерна исходной влажности при одной загрузке, пл. т;

Затраты на амортизацию в расчете на одну загрузку:

$$A = \frac{K_H \cdot a}{N \cdot 100\%}, \quad (5.10)$$

где a – норма отчислений на амортизацию, %, для зерносушилок принимали в размере 14,3%;

K_H – балансовая стоимость устройства с дополнительным оборудованием, руб.;

N – количество загрузок в год, ед.

Затраты на ремонт и техническое обслуживание:

$$P = \frac{K_H \cdot r}{N \cdot 100\%}, \quad (5.11)$$

где r – норма отчислений на техническое обслуживание и ремонт сушилки, %, для зерносушилок принимали 7%.

Затраты электроэнергии на сушку одной партии зерна, определяли по формуле [86]:

$$Z_{\text{Э}} = t \cdot N_{\text{пр}} \cdot \text{Ц}_{\text{Э}}, \quad (5.12)$$

где t – время работы сушилки на одной загрузке, ч;

$N_{\text{пр}}$ – потребляемая мощность привода, кВт;

$\text{Ц}_{\text{Э}}$ – цена 1 кВт·ч электроэнергии, руб./кВт·ч (принимали 10 руб./кВт·ч);

По формуле 5.12 определим затраты на электроэнергию при загрузке и разгрузке аэродинамического устройства зернометателем ТСШ–150 Т (t загрузки – 1 час, t разгрузки – 1 час).

Затраты топлива на сушку одной партии зерна, определяли по формуле:

$$Z_T = \frac{C_T \cdot Z_{Б,Н} \cdot M_B}{Q_{уд}}, \quad (5.13)$$

где M_B – количество влаги, испаряемой из зернового вороха, кг;

$Z_{Б,Н}$ – удельный расход теплоты в сушилке, на испарение одного килограмма влаги в базовом и новом вариантах, кДж/кг_{исп.вл.};

C_T – цена дизельного топлива, руб. (принимаем $C_m = 70$ руб./литр)

$Q_{уд}$ – теплотворная способность топлива, МДж/кг.

Количество влаги, испаряемой при сушке из зерна:

$$M_B = m_v \frac{\omega_n - \omega_k}{100 - \omega_k}, \quad (5.14)$$

где m_v – масса высушиваемого материала, пл. т;

ω_n – влажность зерна до сушки, %;

ω_k – влажность зерна после сушки, %.

Прочие затраты рассчитывали по формуле:

$$Z_{ПР} = 8\%(Z_n + A + P + Z_{Э} + Z_T), \quad (5.15)$$

Таблица 5.4 – Эксплуатационные издержки на сушку одной тонны зерна

Показатель	Базовый	Проектный
Амортизационные отчисления, руб./пл. т	600	496,89
Затраты на ремонт техническое обслуживание, руб./пл. т	293,72	243,23
Затраты на топливо смазочные материалы, руб./пл. т	1084	575
Затраты на электроэнергию при сушке, руб./пл.т	288	35,44
Затраты на электроэнергию при загрузке и выгрузку зерна, руб./пл.т	12	12
Итого	1411,93	645,1

Определим удельную экономию на 1 партию зерна:

$$\mathcal{E}_{y\partial} = I_{\mathcal{E}n}^{баз} - I_{\mathcal{E}n}^{np} \quad (5.16)$$

Определим годовую экономию [82]:

$$\Gamma_{\mathcal{E}} = \mathcal{E}_{y\partial} \cdot N, \quad (5.17)$$

где N – количество циклов работы в год.

Основным критерием экономической эффективности служит годовой минимум приведенных затрат, рассчитанных по формуле:

$$Z_i = K_H^{ПП} \cdot E_H + I_{\mathcal{E}и} \quad (5.18)$$

где $K_H^{ПП}$ – капиталовложения в проектное решение, руб.;

E_H - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений (для новой техники $E_H = 0,20$);

$I_{\mathcal{E}и}$ – эксплуатационные издержки, руб.

Годовой экономический эффект определяли по формуле:

$$\Gamma_{\mathcal{Э}} = Z_{iПП} - Z_{iБ}, \quad (5.19)$$

Срок окупаемости рассчитывали по следующей формуле:

$$T = \frac{K_H}{\Gamma_{\mathcal{Э}}}, \quad (5.20)$$

где K_H – капитальные вложения, руб.;

$\Gamma_{\mathcal{Э}}$ – годовая экономия, руб.

Таблица 5.5 – Эффективность модернизированной сушилки

Показатель	Базовый	Проектный
Стоимость сушилки, руб.	2098000	1737387,7
Эксплуатационные издержки на сушку, руб./пл. т	2729,88	1554,25
- затраты на амортизацию, руб./пл. т	600	496,89
- затраты на ТО и ремонт сушилки, руб./пл. т	293,72	243,23
- затраты на электроэнергию при сушке, руб./пл. т	288	35
- затраты на электроэнергию при загрузке и выгрузке зерна, руб./пл. т	12	12
- затраты на топливо, руб./пл. т	1084	575
- затраты на оплату труда, руб./пл. т	249,9	76,5
Продолжительность сушки, ч.	10	3,06
Производительность сушилки, пл. т/ч	1,25	4,09
Удельная экономия, руб./пл. т		1175,7
Годовые приведенные затраты, руб./пл. т	1134,31	917,26
Годовая экономия, руб.	-	587820,4
Годовой экономический эффект, руб.	-	86818
Срок окупаемости, год	-	2,96

В результате сравнительного экономического анализа установлено, что эксплуатационные издержки у опытного образца ниже, а годовая экономия затрат на сушку при эксплуатации сушилки составит 587,8 тыс. руб.

Выводы по разделу

Расчет комплексного показателя совершенства конструкции зерновой сушилки показал, что аэродинамического устройства для сушки зерна с $K_p = 1,23$ (МДж·т·ч²) / (пл. т · кг. исп. вл.) находится в двойке лучших, уступая бункерной сушилки «Fratelli Pedrotti», серии Large, где $K_p = 0,91$ (МДж·т·ч²) / (пл. т · 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 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.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Активная, реактивная, мощность, коэффициент мощности. Краткая теория [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://khomovelectro.ru/articles/aktivnaya-reaktivnaya-i-polnaya-kazhushchayasya-moshchnosti.html> (дата обращения: 28.05.2024).
2. Алина, А. А. Совершенствование технологии очистки воздуха на элеваторе / А. А. Алина, Э. Р. Бариева // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2023: Сборник трудов девятого международного экологического конгресса (одиннадцатой международной научно-технической конференции), Самара – Тольятти, 20 – 24 сентября 2023 года. – Тольятти: ELPIT. – 2023. – С. 111–116.
3. Афонин, В. А. Анализ конструкций бункерных зерносушилок / В. А. Афонин, Н. М. Максимов // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: Сборник докладов XIII Международной научно-практической конференции молодых ученых, Великие Луки, 12–13 апреля 2018 года. Т. 2. – Великие Луки: Великолукская государственная сельскохозяйственная академия, 2018. – С. 9–14.
4. Барабанная зерносушилка: характеристики, назначение, особенности работы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://zernosushka.ru/barabannaya-sushilka/> (дата обращения 29.06.2021).
5. Бибик, Г. А. Аналитическая зависимость предельной температуры нагрева зерна от влажности и длительности сушки / Г. А. Бибик // Вестник АПК Верхневолжья. – 2015. – № 1. – С. 64–66.
6. Блохин, П. В. Эффективность охлаждения зерна пшеницы на аэрогравитационном транспортере. // Теория и техника сушки зерна.: Сб науч. тр. ВНИИЗ. – М. – 1970. – Вып. 70. – С. 209–216.

7. Бурков, А. И. Машины для послеуборочной обработки семян трав / А. И. Бурков, Н. Л. Коньшев, О. П. Рощин // НИИСХ Северо-Востока, – 2003. – С. 46–47.
8. В продаже зерносушилка порционного типа RIELA GDT 1500 (ГЕРМАНИЯ) [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://agroserver.ru/b/v-prodazhe-zernosushilka-portsionnogo-tipa-riela-gdt-1500-germa-65737.htm>, (дата обращения 29.06.2021).
9. Вальтер, Н. К. Методика испытаний сушильных установок сельскохозяйственного назначения / М-во тракт. и с.-х. машиностроения СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т с.-х. машиностроения им. В. П. Горячкина "ВИСХОМ". – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Отд. науч.-техн. информации. – 1970. – 190 с.
10. Васильев, А. О. Машины для послеуборочной обработки семян трав. Анализ производительности хмелесушилки с частичной рекуперацией тепловой энергии / А. О. Васильев, К. В. Егоров, Р. В. Андреев [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2024. – Т. 19. – № 3. – С. 59–66.
11. Василькова, Т. М. Экономика и организация предприятий АПК: нормативно-справочные материалы / Под ред. Т.М. Васильковой, М.М. Максимова. – Кострома: КГСХА. – 2012. – 430 с.
12. Виды сушки зерна [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://agro-s.com/vidy-sushki-zerna> (дата обращения 20.06.2020).
13. Висневски, Г. Использование плоских солнечных коллекторов в сушильных процессах сельскохозяйственного производства / Г. Висневски // Сельскохозяйственная наука Северо-Востока европейской части России. Т. 4.: Сб. науч. тр. НИИСХ Северо-Востока. – Киров. – 1995. – С. 94–99.
14. Водяников, В. Т. Экономическая оценка проектных решений в агроинженерии: учебник/ В. Т. Водяников, Н. А. Серeda, О. Н. Кухарев [и др.] – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 436 с.

15. Волхонов, М. С. К вопросу обоснования эффективности рециркуляции агента сушки / М. С. Волхонов, И. С. Зырин // А 43 Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сборник статей 65-й международной научно-практической конференции: в 3 т. — Караваево: Костромская ГСХА, 2014. Т.2 Архитектура и строительство. Механизация сельского хозяйства. Электрификация и автоматизация сельского хозяйства/ под ред. В. М. Попова, А. С. Полозова, А. В. Рожнова — Караваево: Костромская ГСХА. – 2014. – С. 224.

16. Волхонов, М. С. 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.

17. Волхонов, М. С. Обоснование и совершенствование процессов и устройств для послеуборочной обработки зерна: дис. д-ра техн. Наук: – Котрома; КГСХА. – 2008. – С.480

18. Волхонов, М. С. Основные понятия о математическом планировании многофакторных экспериментов, обработке экспериментальных данных и случайных процессах / М.С Волхонов, С.Ю. Зудин, И.Б. Зимин, И.С. Зырин. – Котрома: КГСХА, 2011. – 80 с.

19. Волхонов, М. С. Повышение эффективности функционирования зерносушилки аэрожелобного типа в энергосберегающем режиме ее работы путем автоматизации системы рециркуляции отработавшего агента сушки / М. С. Волхонов, И. Б. Зимин, И. А. Смирнов // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 2. – С. 23–29.

20. Волхонов, М. С. 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.

21. Волхонов, М. С. 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.

22. Волхонов, М. С. 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.

23. Волхонов, Р. М. Анализ существующих технологий послеуборочной обработки зерна // Материалы XI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018017084> (дата обращения: 18.03.2025).

24. Голубкович, А. В. К обоснованию технических средств для предварительного подогрева и подсушки зерна повышенной влажности / А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков //Сб. науч. тр. /ВИМ, Москва, –1980. – Т. 86. – С. 36–46.

25. Голубкович, А. В. Сушка высоковлажных семян и зерна / А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков – М.: Росагропромиздат. – 1991. – 174 с.

26. Гольтяпин, В. Я. Анализ технического уровня современных передвижных зерносушилок / В. Я. Гольтяпин // Техника и оборудование для села. – 2018. – № 5. – С. 21–29.

27. ГОСТ Р 55262-2012. Сушильные машины и установки сельскохозяйственного назначения. Методы испытаний. – Введ. 29.11.2012– М.: Стандартинформ. – 2012.

28. ГОСТ Р 7.0.11-2011. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления. – Введ. 01.09.2012. – М.: Стандартинформ, 2015.

29. Гришин, М. А. Установки для сушки пищевых продуктов / М.А. Гришин, В. И. Атаназевич, Ю. Г. Семёнов – М.: ВО Агропромиздат. – 1989. – 216 с.

30. Дмитрий Патрушев: Урожай зерновых в 2024 году составит порядка 130 млн тонн [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/news/52960/> (дата обращения 20.12.2024).
31. Достоинства и недостатки типов зерносушилок [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sdexpert.ru/archive/project/dostoinstva-i-nedostatki-tipov-zernosushilok/> (дата обращения 29.06.2021).
32. Енохович, А. С. Справочник по физике и технике: Учеб. Пособие для учащихся / А. С. Енохович – 3-е изд., перераб. и доп. – М.; Просвещение. – 1989. – 120 с.
33. Ерошенко, Л. И. Анализ технико-технологических особенностей мобильных бункерных зерносушилок в условиях Северо-Западного региона РФ / Л. И. Ерошенко, А. Н. Перекопский // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 51. – С. 276–280.
34. Журавлёв, А. П. Зерносушение и зерносушилки: монография / А. П. Журавлёв; М-во сельского хозяйства Российской Федерации, Самарская государственная сельскохозяйственная академия. – Кинель: РИЦ СГСХА. – 2014. – 293 с.
35. Захарченко, И. В. Послеуборочная обработка семян в Нечерноземной зоне / И.В. Захарченко. – М.: Россельхозиздат, 1983. – 263 с.
36. Зерно и продукты его переработки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.agroprod mash-expo.ru/ru/articles/zerno-i-produkty-ego-pererabotki/> (дата обращения 01.02.2025).
37. Зерносушилка АТМ. Обзор мобильных зерносушилок [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dzen.ru/a/X8T8iE-jATsjO7SJ> (дата обращения 29.06.2021).
38. Зерносушилка К4-УСА [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.prosushka.ru/1902-zernosushilka-k4-usa.html> (дата обращения 29.06.2021).
39. Зерносушилка мобильная рециркуляционная тип GTR [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://riela-mki.ru/catalog/zernosushilki/statsionarnye->

zernosushilki-riela-serii-gdt/?ysclid=mbgp5or4cq739922978 (дата обращения 29.06.2021).

40. Зерносушилка передвижная К4-УС2-А [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://agromash-nn.ru/prod/zerno_sush/walk/ (дата обращения 29.06.2021).

41. Зерносушилки Mecmar (Италия) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://krasselmash.ru/zernosushilki-mecmar-italiya> (дата обращения 29.06.2021).

42. Зерносушилки Mecmar (Италия) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.mecmargroup.com/ru/catalogo/mobilnye_susilki-2/cpt-ru/model-cpt_7_61_f-1 (дата обращения 29.06.2021).

43. Зерносушилки АТМ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://steh.info/agregaty/posleuborochnaya-tekhnika/zernosushilki/zernosu-shilki-atm.html> (дата обращения 29.06.2021).

44. Ибрагимов, У. Х. Утилизация теплоты отработанного газа и воздуха в конвективных сушильных установках с помощью теплового насоса / У. Х. Ибрагимов, Т.Р. Аванесов // Молодой Ученый. Международный научный журнал. – 2021. – № 21 (363). – С. 31–37.

45. Иванов, Б. Л. Пути снижения энергетических затрат при сушке зерна. Развитие АПК и сельских территорий в условиях модернизации экономики / Б. Л. Иванов, Б. Г. Зиганшин, И. Н. Сафиуллин // Материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.э.н., профессора Н.С. Каткова, Казань, 19 февраля 2021 года. Казань: Казанский государственный аграрный университет. –2021. – С. 83–89.

46. Иванов, Н. М. Энергозатраты при послеуборочной обработке зерна / Н. М. Иванов, Г. Е. Чепурин // Достижения науки и техники АПК. –2017. –Т. 31. – № 4. – С. 87–90.

47. Иванова, А. Н. Методы снижения запыленности на промышленных предприятиях / А. Н. Иванова // Студенческий вестник. – 2021. – № 44. – 8(189). – С. 9–11.
48. Информация о проведении конференции в г. Анапа Краснодарского края 11-15 июня 2012 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.drying-committee.ru/dl.php?f=203> (дата обращения 20.06.2020).
49. Калинушкин, М. П. Насосы и вентиляторы. Учеб. пособие для вузов по спец. "Теплогазоснабжение и вентиляция" / М. П. Калинушкин. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк. – 1987. – 175 с.
50. Классификация зерносушилок, их принцип, устройства и назначение [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://suplicio.ru/zernosushenie/165-52-classification-of-dryers.html#h3> (дата обращения 20.06.2025).
51. Колонковые зерносушилки: характеристики, назначение, особенности работы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://zernosushka.ru/kolonkovaya-sushilka/> (дата обращения 29.06.2021).
52. Конвейерные зерносушилки: назначение, преимущества, особенности работы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://zernosushka.ru/konveernaya-sushilka/> (дата обращения 29.06.2021).
53. Конвективный способ сушки семян [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://studwood.ru/1800475/agropromyshlennost/konvektivnyy_sposob_sushki_semyan (дата обращения 29.06.2021).
54. Королев, С. Н. Исследование путей снижения затрат при обработке семенного зерна / С. Н. Королев, А. Л. Рыбальченко, Н. Н. Кузнецов // Молодежная наука - развитию агропромышленного комплекса: Материалы V Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Курск, 21 ноября 2024 года. – Курск: Курский государственный аграрный университет им. И.И. Иванова. – 2025. – С. 21–24.

55. Кузнецов, Н. Н. Модель функционирования технологического процесса послеуборочной обработки зерна в отделении приема и предварительной очистки зернового вороха / Н. Н. Кузнецов, Н. Н. Пушкаренко, В. И. Медведев [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2018. – Т. 13. – № 4 (51). – С. 114–118.

56. Кузнецов, Н. Н. Повышение эффективности работы сушильных устройств путем использования теплоты отработанного агента сушки / Н. Н. Кузнецов, В. Н. Вершинин, В.Е. Никифоров, Г.А. Симонов, О.Б. Филиппова // Наука в центральной России Science in the central Russia. – 2023, – Т. 61. – № 1. – С. 34–42.

57. Куценко, К. И. Сушка зерна / К.И. Куценко, В.И. Атаназевич, В.И. Пешкова, С.И. Кириченко // Актуальные вопросы послеуборочной обработки и хранения зерна.: Сб. науч. тр. ВИМ. – М. – 1973 – С. 117–118.

58. Малин, Н. И. Справочник по сушке зерна / Н. И. Малин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 159 с.

59. Малин, Н. И. Энергосберегающая сушка зерна. Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений / Н. И. Малин. – М.: Колос, 2004 – 240 с.

60. Мальтри, В. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / В. Мальтри, Э. Пётке, Б. Шнайдер // Машиностроение. 1979. – 530 с.

61. Манасян, С. К. Пути снижения энергозатрат при сушке зерна. Материалы международной научной конференции. Проблемы современной аграрной науки / С. К. Манасян, М. С. Манасян, Г. С. Манасян и др. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.kgau.ru/new/all/konferenc/06/> (дата обращения 01.02.2025).

62. Машковцев, М. Ф. Реконструкция типовых зерноочистительно-сушильных комплексов / М. Ф. Машковцев // Сельскохозяйственная наука Северо-Востока европейской части России. – Т. 4.: Сб. науч. тр. НИИСХ Северо-Востока. – Киров, 1995. – С. 73–84.

63. Методика определения средней арифметической величины [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://citoweb.yvspu.org/link1/metod/met90/node10.html> (дата обращения 15.03.2024).
64. Мильман, И. Э. Оптимизация конвейерных зерносушилок / И. Э. Мильман, В. В. Шевцов, Ю.В. Есаков // Актуальные вопросы послеуборочной обработки и хранения зерна.: Сб. науч. тр. ВИМ. – М. – 1973. – С.114–115.
65. Мобильная зерносушилка «Гулливер 12» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.stankostroy12rus.ru/zs3.html> (дата обращения 29.06.2021).
66. Мобильная зерносушилка Agrex [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.baitekmachinery.ru/dryers/869/2940/> (дата обращения 29.06.2021).
67. Мобильная зерносушилка Fratelli Pedrotti 19м3 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://agroserver.ru/b/mobilnaya-zernosushilka-fratelli-pedrotti-19-m3-871231.htm?ysclid=mbgpdu9a4b896975349> (дата обращения 29.06.2021).
68. Мобильная зерносушилка Fratelli Pedrotti 40м3 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://agroserver.ru/b/mobilnaya-zernosushilka-fratelli-pedrotti-40m3-1187150.htm?ysclid=m9wg5r35ng423394558> (дата обращения 29.06.2021).
69. Мобильная зерносушилка Fratelli Pedrotti 50м3 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://agroserver.ru/b/mobilnaya-zernosushilka-fratelli-pedrotti-50m3-972290.htm> (дата обращения 29.06.2021).
70. Мобильная зерносушилка Fratelli Pedrotti 57м3 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://agroserver.ru/b/mobilnaya-zernosushilka-fratelli-pedrotti-57m3-972316.htm> (дата обращения 29.06.2021).
71. Мобильная Зерносушилка Fratelli Pedrotti Basic 120 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://agroserver.ru/b/mobilnaya-zernosushilka-fratelli-pedrotti-basic-120-1217272.htm>, (дата обращения 29.06.2021).
72. Мобильная зерносушилка Fratelli Pedrotti Basic 55 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://agroserver.ru/b/mobilnaya-zernosushilka-fratelli-pedrotti-basic-55-943747.htm>, (дата обращения 29.06.2021).

73. Мобильная зерносушилка АТМ 75 С [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://kostroma.tiu.ru/p443222612-mobilnaya-zernosushilka-atm.html> (дата обращения 29.06.2021).
74. Мобильная зерносушилка Гулливер 12 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://barnaul.flagma.ru/mobilnaya-zernosushilka-gulliver-12-o4341878.html> (дата обращения 29.06.2021).
75. Мобильные зерносушилки Fratelli Pedrotti XL 550 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://agroservers.ru/b/mobilnye-zernosushilki-fratelli-pedrotti-xl-550-b-u-s-minima-1108055.htm> (дата обращения 29.06.2021).
76. Мобильные зерносушилки Fratelli Pedrotti XL 550 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://агropоволжье.рф/hranenie-pererabotka-zerna/zernosushilki/mobilnye/fratelli-pedrotti-xl-550.html> (дата обращения 29.06.2021).
77. Мобильные зерносушилки МЕРУ М150К М300М РК [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://krasnoyarsk.tiu.ru/p445317510-mobilnye-zernosushilki-meru.html> (дата обращения 29.06.2021).
78. Мобильные зерносушилки Turbodan. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://svmagrotech.com/production/zernosushilka/zernosushilka-mobilnaya/> (дата обращения 29.06.2021).
79. Мобильные зерносушилки прицепы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://atagos.com.ua/product/zernosushilki-pritsepy/> (дата обращения 29.06.2021).
80. Морозов, В. В. Сравнительный анализ конструкций бункерных зерносушилок зарубежного и отечественного производства / В. В. Морозов, Н. М. Максимов // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. — 2014. — № 2. — С. 29–35.
81. Муханов, Н. В. Экспериментальные исследования технологического процесса рециркуляционной зерносушилки бункерного типа / Н. В. Муханов,

С. А. Марченко, В. В. Воронков [и др.] // Resources and Technology. – 2016. – Т. 13. № 4. – С. 93–105.

82. Окунь, Г. С. Тенденции развития технологии и технических средств сушки зерна / Г.С. Окунь, А.Г. Чижиков. –М.: ВНИИТЭИ агропром, 1987. – 56с.

83. Панченко, С. В. Оценка использования процесса рециркуляции сушильного агента в барабанной сушилке / С. В. Панченко, И. Э. Липкович, А. Н. Токарева и др. // Сельский механизатор. – 2023. – № 9. – С. 18–19.

84. Патент 20005968 Российская Федерация, МПК F26В. Способ сушки зерна в сушильных установках шахтного типа / Л.В. Колесов, Н.М. Адрианов, А.Г. Гущинский, Н.В. Александров / патентообладатель Ленинградский сельскохозяйственный институт, Новгородский сельскохозяйственный институт, заявл. 29.03.1991, опубл. 15.01.1994.

85. Патент 2671464 Российская Федерация, МПК А 01 F 25/08. Устройство для вентилирования и транспортирования зернового вороха / М.С. Волхонов, И.А. Смирнов, Е.С. Сочкова; патентообладатель ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», заявл.05.12.2017, опубл. 31.10.2018.

86. 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.

87. Планы на посевную России в 2024 году. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://grainrus.com/novosti-kompanii/articles/plany-na-posevnuyu-v-rossii-v-2024-godu/> (дата обращения 20.12.2024).

88. Прайс лист Месмар [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.agrobase.ru/organizations/manufacturer/pdmanufacturer_d89ff621-eb29-4fef-88ee-7ec9ca3bbec6/pricelist (дата обращения 29.06.2021).

89. Приказчиков, В. С. Способы сушки зерна / В. С. Приказчиков, П. С. Агеев // Материалы V Международной студенческой научной конференции «В мире научных открытий». Ульяновск. –2021. – С. 407–411.
90. Применение SCADA-СИСТЕМ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://digam.ru/blog/primenenie-scada-sistem/> (дата обращения 13.03.2025).
91. Процесс сушки. Конвективная и кондуктивная сушка [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://proizteh.ru/sushka.html> (дата обращения 20.05.2020).
92. Прямоточная мобильная сушилка RIELA, тип GDT [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://rielasib.ru/images/files/1281433887.pdf> (дата обращения 29.06.2021).
93. Птицын, С. Д. Изменение сыпучести и натурального веса зерна при сушке / С. Д. Птицын, Т. В. Третьякова, Г. С. Окунь // Теория и техника сушки зерна.: Сб науч. тр. ВНИИЗ. – М. – 1970. – Вып. 70. – С. 105–108.
94. Птицын, С. Д. Зерносушилки / С. Д. Птицын. – Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. Москва. 1962 – 3 с.
95. Птицын, С. Д. Зерносушилки / С. Д. Птицын. – 2–е изд. испр. и доп. - М.: Машиностроение. 1968. – 214 с.
96. Раецкис, П. Ю. Энергосберегающая технология сушки зерна/ П.Ю. Раецкис, Я.Г. Палабинскис //Тр. ЛСХА. Латв. с.-х. акад., 1988. – Вып. 250. – С. 94–97.
97. Разработка и исследование устройства для приема и сушки высоко-влажных семян сои [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.neliti.com/media/publications/308170-design-and-study-of-equipment-for-accept-3ec8ea1e.pdf> (дата обращения 15.02.2025).
98. Росстат обновил данные по урожаю. Повышены оценки сбора зерна, масличных, а также сахарной свеклы [Электронный ресурс]. — Режим доступа:

<https://www.agroinvestor.ru/analytics/news/41930-rosstat-obnovil-dannye-pourozhayu/> (дата обращения 20.12.2024).

99. Серeda, Н. А. Экономическое обоснование проектных решений в агроинженерии: Методические рекомендации по выполнению экономической части выпускных квалификационных работ для студентов по направлению подготовки «Агроинженерия» очной и заочной форм обучения / сост. Н. А. Серeda, Т. И. Павлушина. — Кострома: КГСХА. – 2014. – 99 с.

100. Сорочинский, В. Ф. Снижение расхода топлива в прямоточных зерносушилках [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/7-8_24/2024_07-08_46-49.pdf (дата обращения 20.06.2025).

101. Соседов, Н. И. Современные проблемы теории и техники сушки зерна / Н. И. Соседов, Н. В. Шухнова // Теория и техника сушки зерна.: Сб науч. тр. ВНИИЗ. – М. – 1970. – Вып. 70. – С. 36–42.

102. Спиридонова, М. Г. Сушка высоковлажных семян подсолнечника комбинированным методом / М. Г. Спиридонова // Актуальные вопросы послеуборочной обработки и хранения зерна.: Сб. науч. тр. ВИМ. – М. – 1973. – С. 118–120.

103. Способ сушки с частичной рециркуляцией отработанного воздуха позволяет. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mksegment.ru/a/sposob-sushki-s-chastichnoj-recirkulyaciej-otrabotannogo-vozduha-pozvolyaet> (дата обращения 20.03.2025).

104. Справочное пособие. Влажный воздух. П «Инженеры по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике» (НП «АВОК») Москва – 2004 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data1/44/44694/> (дата обращения 10.11.2023).

105. Сравнение конвейерных и шахтных зерносушилок [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://asm-agro.ru/articles/sravnenie-konvejernyh-i-shahtnyh-zernosushilok/> (дата обращения 29.06.2021).

106. Сравнительный анализ конструкций бункерных зерносушилок зарубежного и отечественного производства [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-konstruktsiy-bunkernyh-zernosushilok-zarubezhnogo-i-otechestvennogo-proizvodstva> (дата обращения 29.06.2021).

107. Сутягин, С. А. Снижение удельного расхода энергии при сушке зерна / С. А. Сутягин, В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин, В. И. Долгов // Известия Самарской ГСХА. – Т. 2. – № 2. – 2017. – С. 39–45.

108. Сушилка для сельскохозяйственных продуктов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://patenton.ru/patent/RU2042095C1> (дата обращения 29.06.2021).

109. Сушилка зерна передвижная СЗП–32 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.belrusagro.com/techno/catalog/707/1544/?ysclid=mb6nkdrka7379192580/> (дата обращения 29.06.2021).

110. Сушилка мобильная семенная СМС – 8 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://agrovektor.ru/physical_product/250693_sushilka_mobilnaya_semennaya_sms_8.html (дата обращения 29.06.2021).

111. Сушилка СПК 2,5 фермерская [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://bizorg.su/zernosushilki-r/p13182254-sushilka-spk2-5-fermerskaya> (дата обращения 29.06.2021).

112. Сушилка фермерская колонковая СПК-2,5 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.b2b-center.ru/catalog/tovari/sushilka-fermerskaia-kolonkovaia-spk-2-5-4570847/> (дата обращения 30.05.2025).

113. Сушилки зерна Меру [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://voltrak.ru/zernosushilki-meru?ysclid=mb6n1pwotx761333400> (дата обращения 29.06.2021).

114. Сушка зерна – важнейший технологический процесс в сельском хозяйстве [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://zernokorm.biz/sushka-zerna->

vazhnejshij-technologicheskij-process-v-selskom-hozyajstve (дата обращения 20.12.2024).

115. Тарабаев, Б. К. Пути совершенствования процесса сушки зерна / Б. К. Тарабаев, А. П. Журавлев, Л. М. Сарлыбаева // Вестник Алматинского технологического университета. – 2015. – № 4. – С. 52–57.

116. Технологии и средства механизации сельского хозяйства [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://vestnik.mrsu.ru/content/pdf/20-2/04.pdf> (дата обращения 20.12.2024).

117. Технология сушки семенного зерна [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://studwood.ru/1800473/agropromyshlennost/tehnologiya_sushki_semennogo_zerna (дата обращения 20.05.2020).

118. Типы зерносушилок. Шахтные зерносушилки. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://agrosplus.ru/stati/tipy-zernosushilok/> (дата обращения 29.06.2021).

119. Хакимов, Ш. Ш. Сушильно-очистительный агрегат с системой рециркуляции сушильного агента / Ш. Ш. Хакимов, Е. А. Мирошников, П. Н. Бородин // Universum: технические науки: электронный научный журнал. – 2018. – № 1 (46). – С. 4–6 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/5463> (дата обращения: 01.02.2025).

120. Чижиков, А. Г. Технологические основы и перспективы развития технических средств сушки зерна в сельском хозяйстве / А. Г. Чижиков // Сб. науч. тр. /ВИМ. – М. – 1980. – Том 86. – С. 26–36.

121. Что такое автоматизированные системы управления, зачем они нужны и какие функции выполняют [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.insales.ru/blogs/university/что-такое-автоматизированные-системы-управления> (дата обращения 13.03.2025).

122. Шахтная сушилка: какие у неё минусы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://zen.yandex.ru/media/id/5e82c672bb31c2679c6e7d8e/shahtnaia->

sushilka-kakie-u-nee-minusy-5ea11be298c2d801bbb1952b (дата обращения 29.06.2021).

123. Щепилов, Н. Я. Проектирование поточных линий и зерноочистительно-сушильных комплексов / Н. Я. Щепилов // Великие Луки: Издательский центр ВГСХА. 1999.– 180 с.

124. Щербаков, Н. В. Современное состояние производства зерна в России / Н. В. Щербаков, Е. С. Максимова, Ж. Д. Нко'о // Траектории социально-экономического развития региона в условиях внешнеполитического санкционного давления: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Мичуринск-научоград РФ, 25 апреля 2023 года / Под редакцией Н.В. Карамновой. – Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет. – 2023. – С. 305–308.

125. Энергосберегающие технологии обработки семян на основе машин нового поколения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://k-rmz.ru/info/articles/energoberegayushhie-tehnologii-obrabotki-semyan-na-osnove-mashin-novogo-rokoleniya/> (дата обращения 01.02.2025).

126. Энергосбережение в технологиях послеуборочной обработки зерна и семян [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://belagromech.by/news/energoberezhenie-v-tehnologiyah-posleuborochnoj-obrabotki-zerna-i-semyan/> (дата обращения 01.02.2025).

127. Юхник, И. П. Наука и практика ресурсосберегающего использования зернового сырья совершенствованием его подготовки и переработки в пищевые продукты: специальность 05.18.12 "Процессы и аппараты пищевых производств": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Юхник Иван Петрович. – 2021. – 166 с.

128. Яговкин, П. В. Основные направления реконструкции зернотоков. //Совершенствование технологий и технических средств механизации в полеводстве и

животноводстве / П. В. Яговкин, С. Д. Гуцин // Сб. науч. тр. НИИСХ Северо-Востока. – Киров, – 1993. – С. 29–31.

129. Агрех PRT [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://zerno-sushilka-agrex-prt200me.agro-store.com/> (дата обращения 29.06.2021).

130. Drincha, V. M. Fundamentals and Prospects for the Technologies Development for Post-Harvest Grain Processing and Seed Preparation / V. M. Drincha, Yu. S Tsench. // *Agricultural Machinery and Technologies*. – 2020. – Vol. 14. No. 4. – P. 17– 25.

131. Fábio, B. Trends in Modeling and Sensing Approaches for Drying Control, Drying Technology / Fábio B. Freire, Gustavo N. A. Vieira, José T. Freire & Arun S. Mujumdar // *An International Journal*, – 32:13. – P. 1524–1532,

132. Hansen, R. C. Current Grain Drying Practices in Ohio / R. C. Hansen, M. A. Berri, H. M., Keener, R. J. Gustafson // *Applied Engineering in Agriculture*, – 1996. – № 12. – S. 65–69.

133. Maltry, W. Grain drying / W. Maltry // *Yearbook –/KTBL. LAV. VDI-MEG*, 1997. – № 9. – S. 157–160.

134. Munzing, K. Aktuelle Fragen zur Trocknung von Weizen / K. Munzing // *Die Muhle und Mischfuttertechnik*, 1996. Munzing – № 133. – S. 233–234.

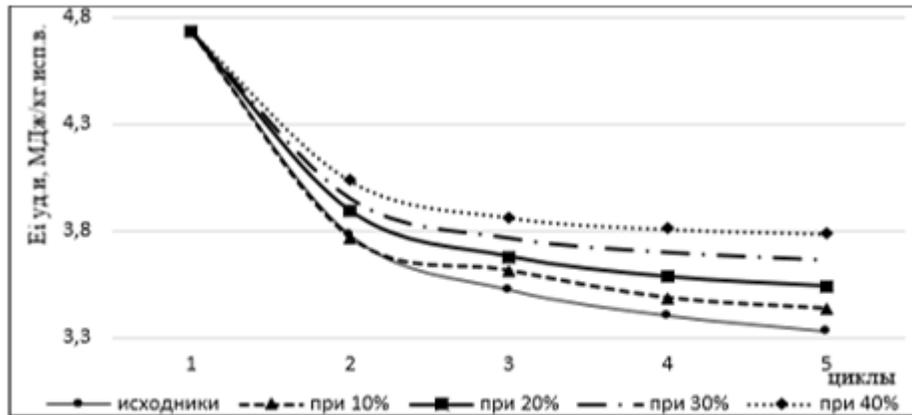
135. Riela GDT 300/24/3 [Электронный ресурс]. URL: <https://ehkskavator.ru/item/214163> (дата обращения 20.06.2025).

136. Tylman, M. Concept of heat recovery in drying with chemical heat pump/ Tylman, M., P. Wawrzyniak. 2018. DOI: 10.4995/IDS2018.2018.7271.

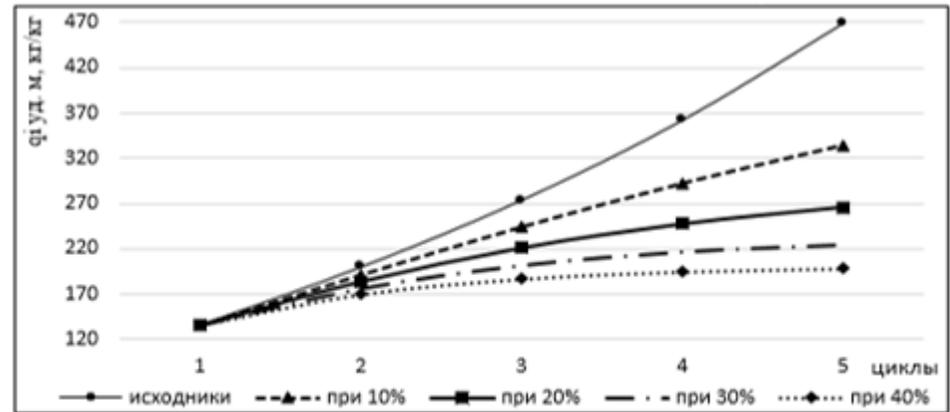
137. Volkhonov, M. Design and study of equipment for accepting and drying soya seeds with high moisture content. / M. Volkhonov, I. Smirnov, I. Maksimov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 3, – Issue 11 (99). – P. 70– 78.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

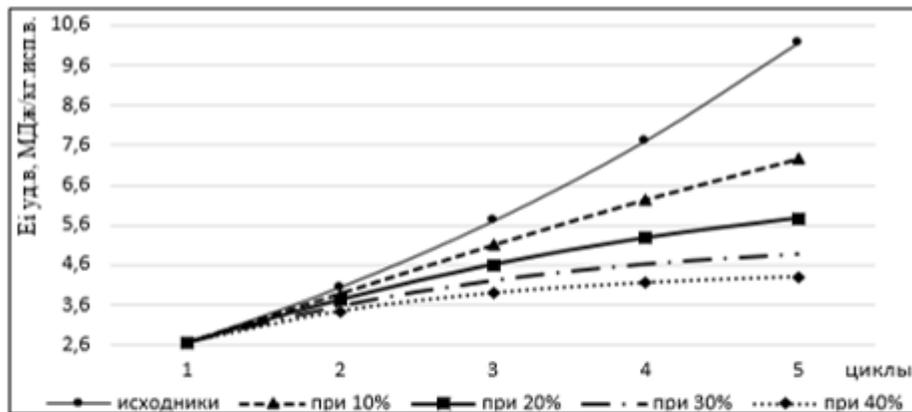
(справочное)



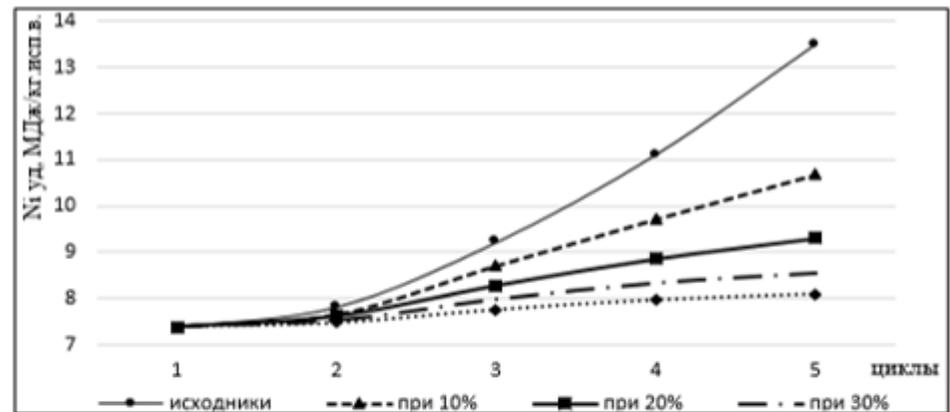
а



б

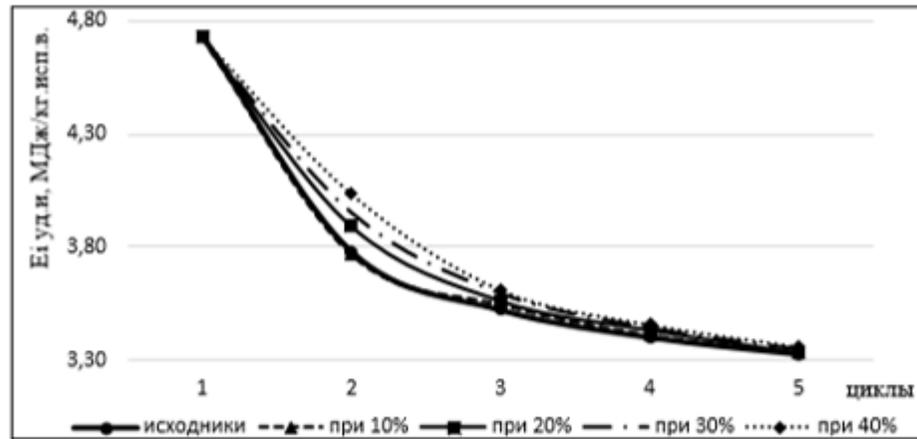


в

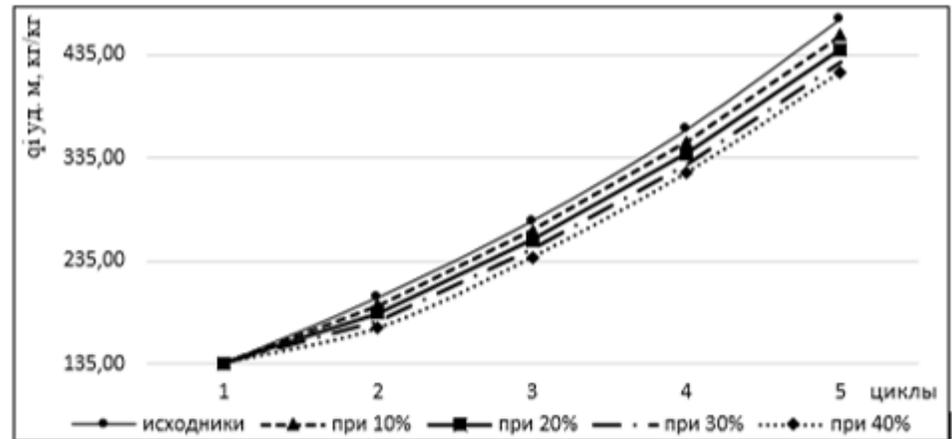


г

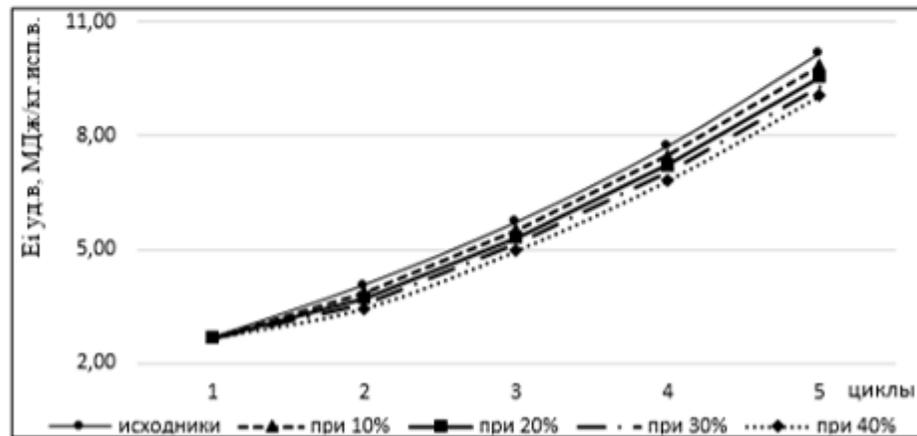
Рисунок А1– Графические зависимости постоянного подмешивания отработавшего агента при 40 °С на каждый цикл сушки между: а – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; б – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; в – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; г – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента



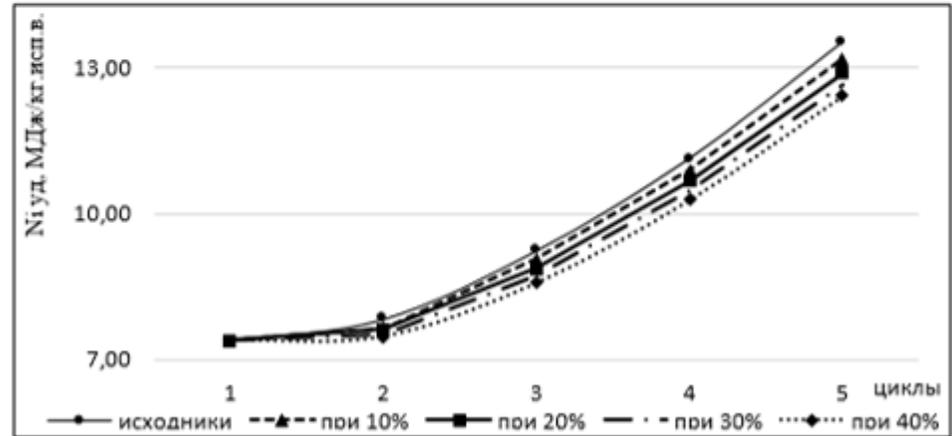
а



б

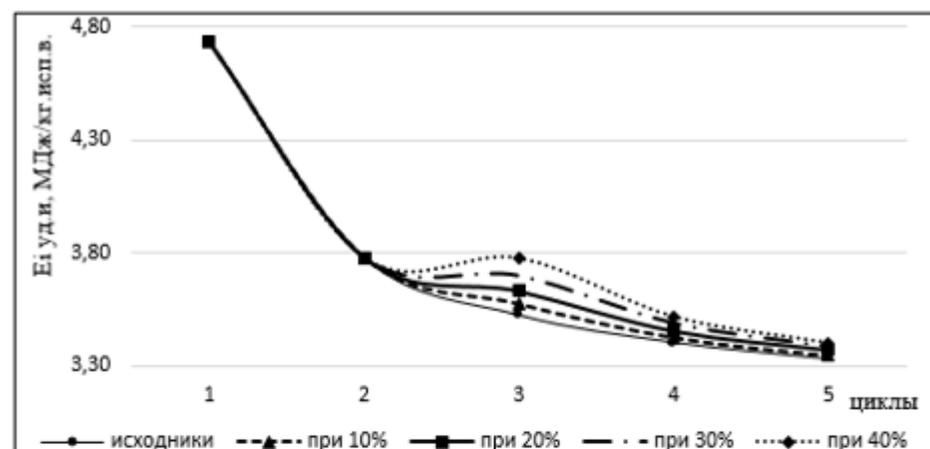


в

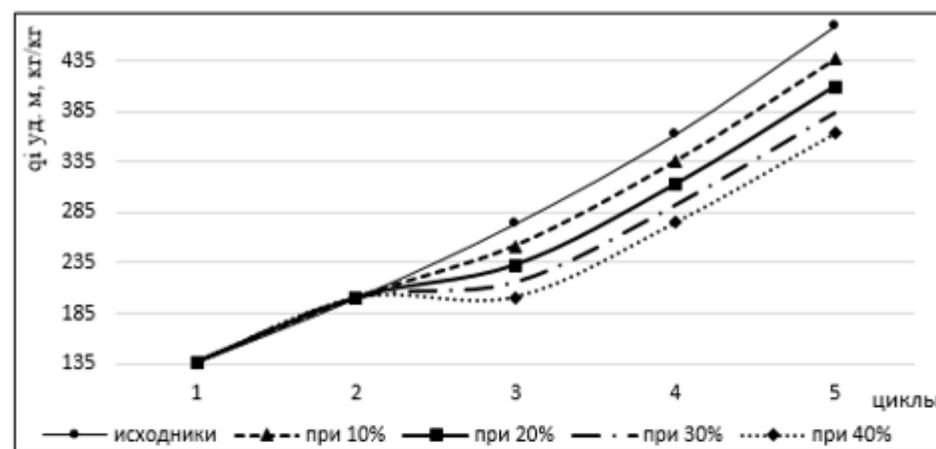


г

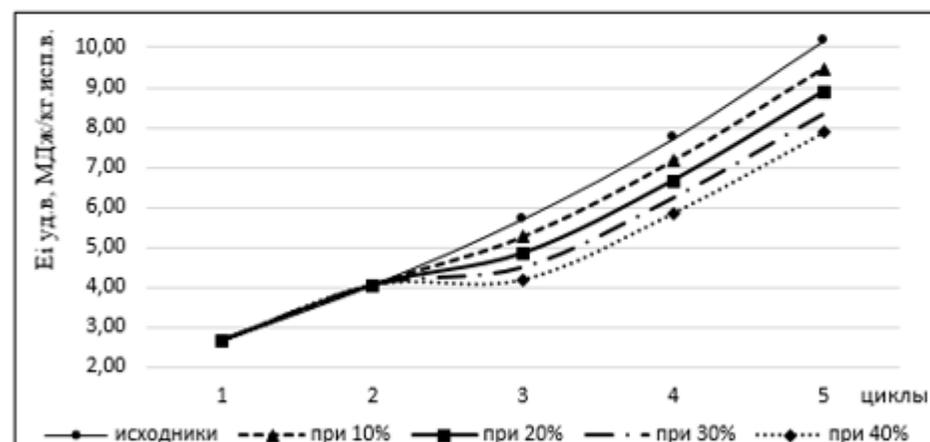
Рисунок А2 - Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 40 °С после 1 цикла сушки между: а – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; б – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; в – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; г – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента



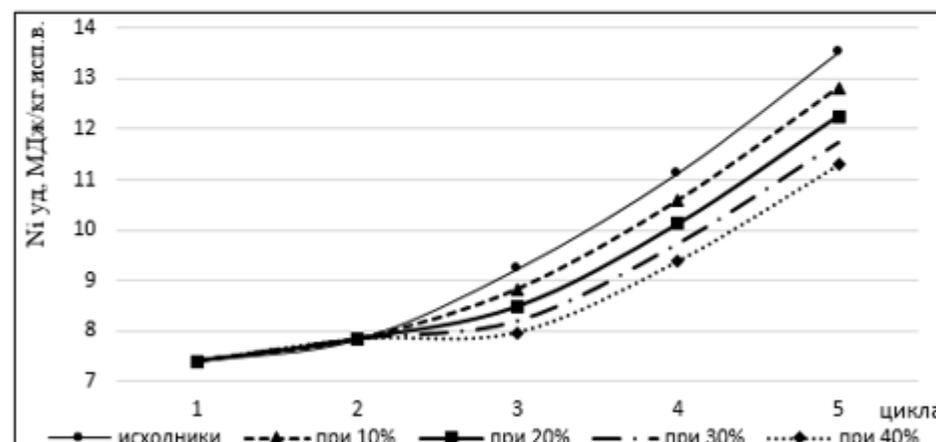
а



б

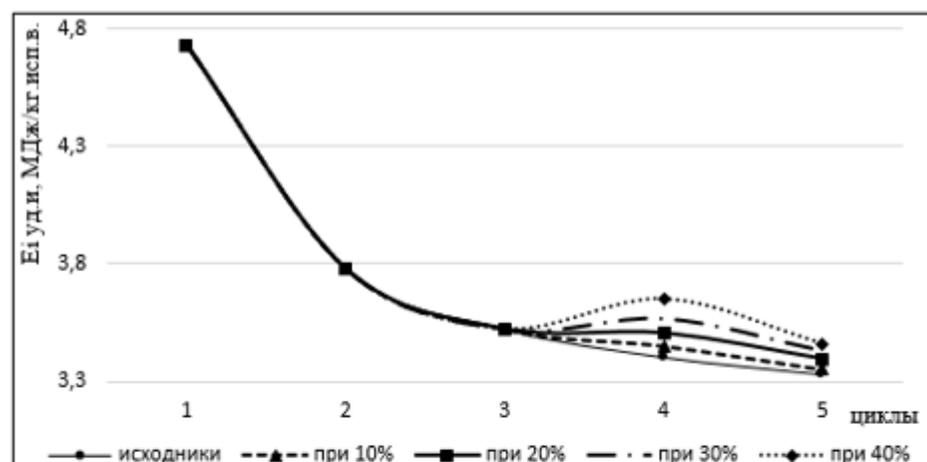


в

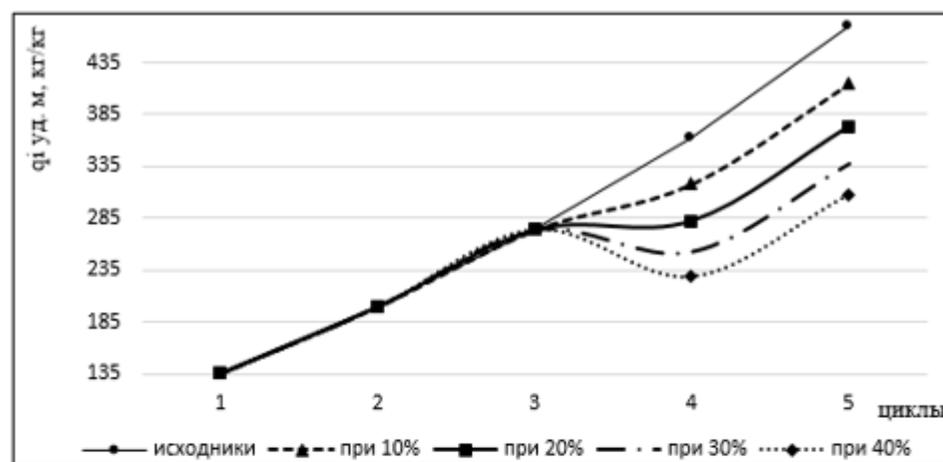


г

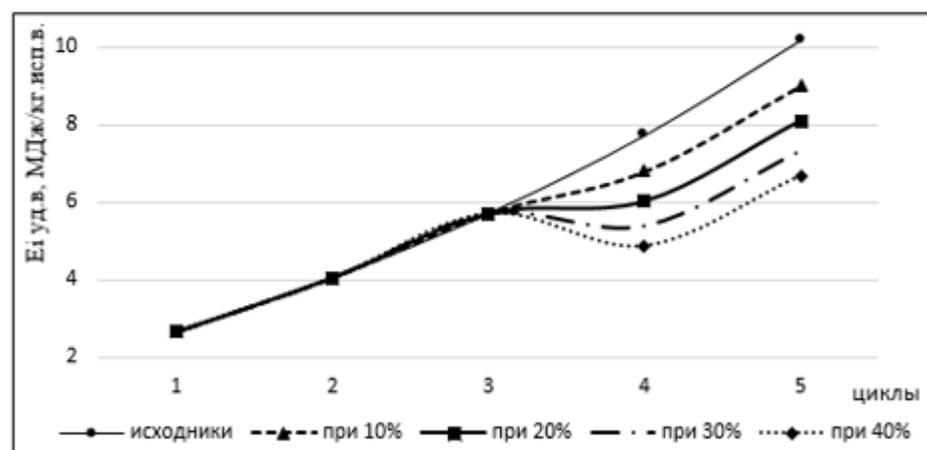
Рисунок А3 – Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 40 °С после 2 цикла сушки между: а – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; б – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; в – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; г – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента



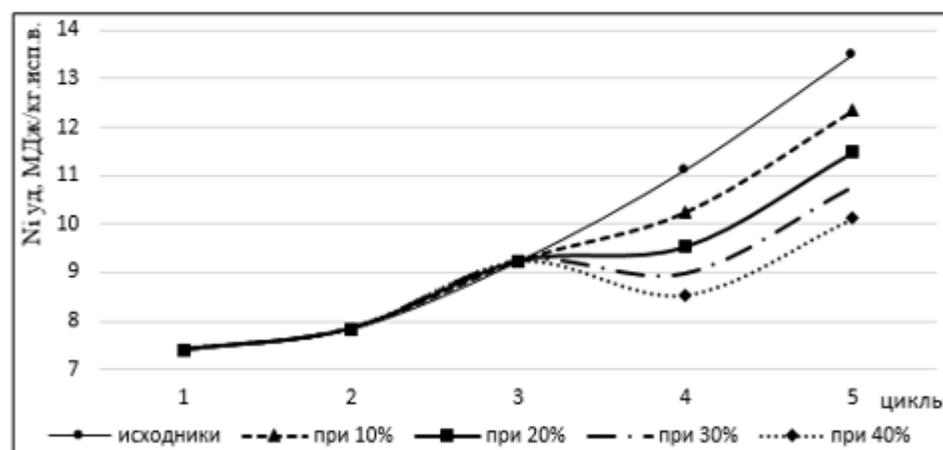
а



б



в



г

Рисунок А4 – Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 40 °С после 3 цикла сушки между: а – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; б – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; в – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; г – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента

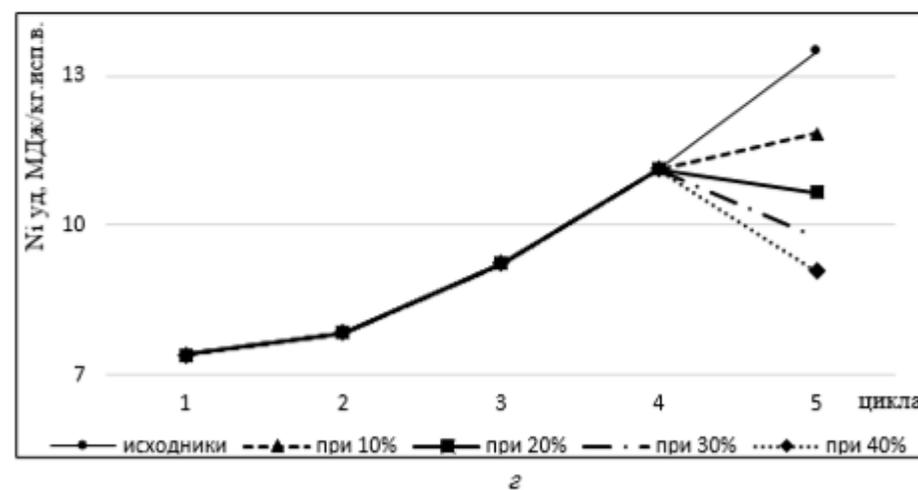
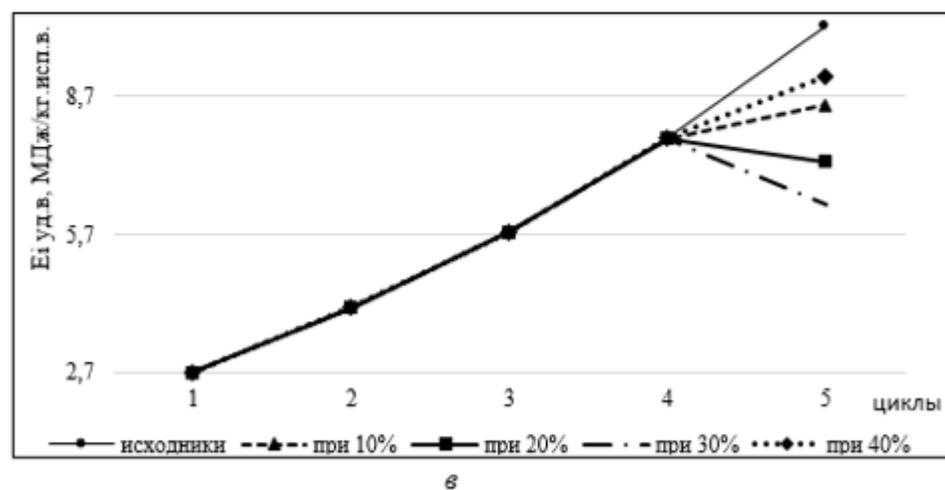
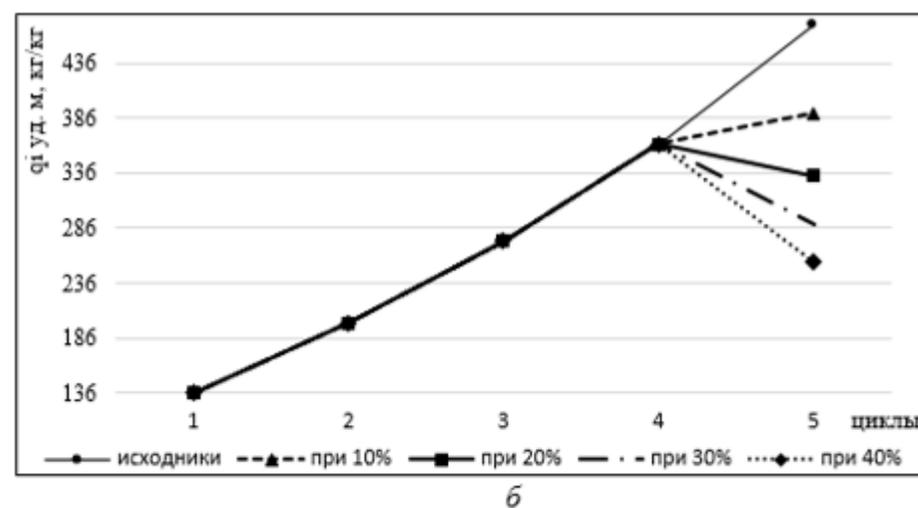
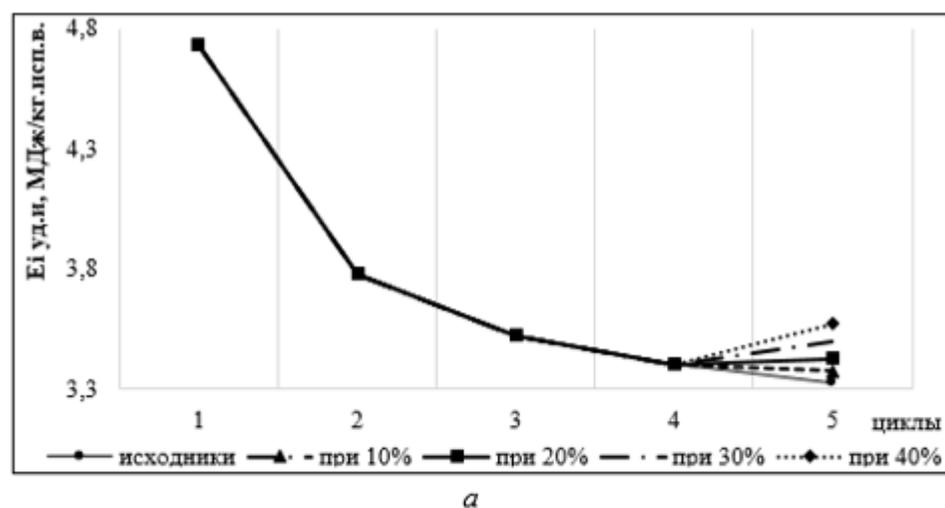


Рисунок А5 – Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 40 °С после 4 цикла сушки между: *а* – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; *б* – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; *в* – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; *г* – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента

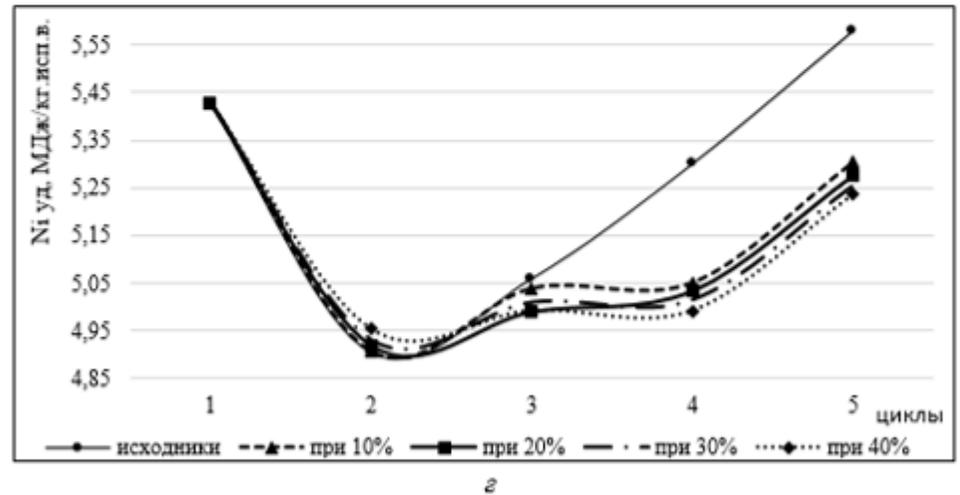
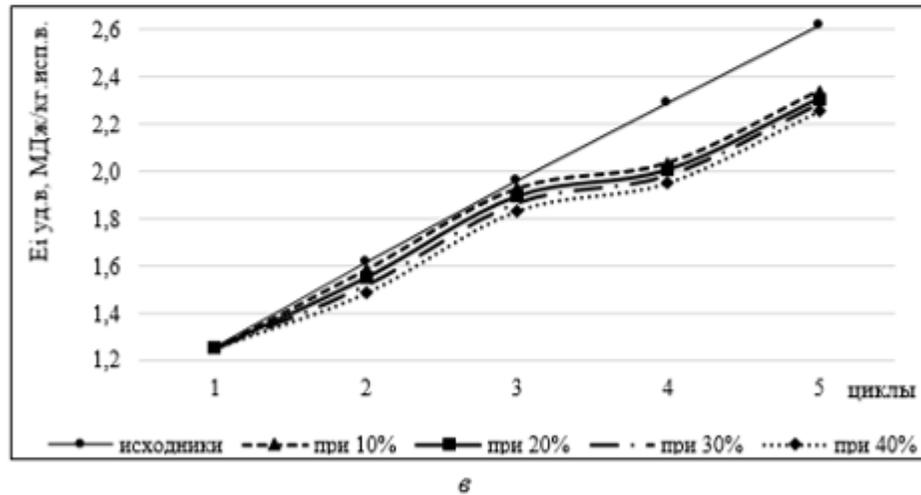
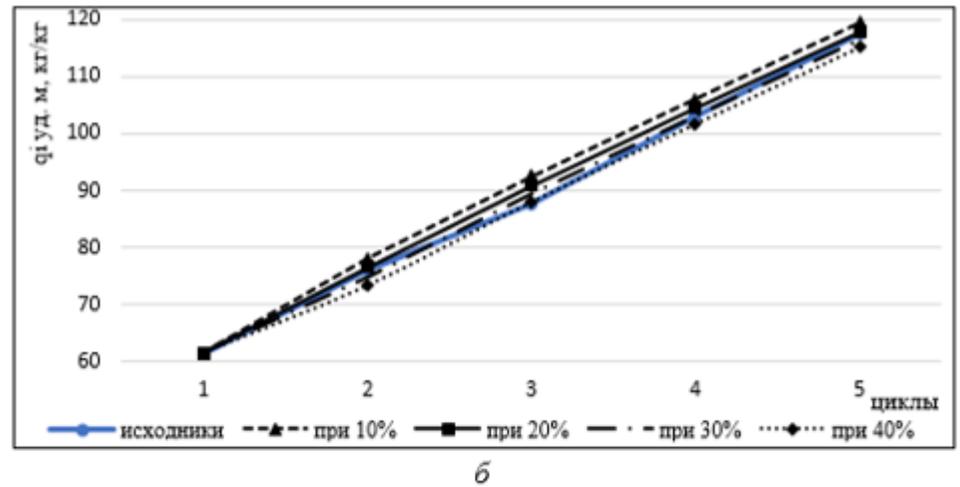
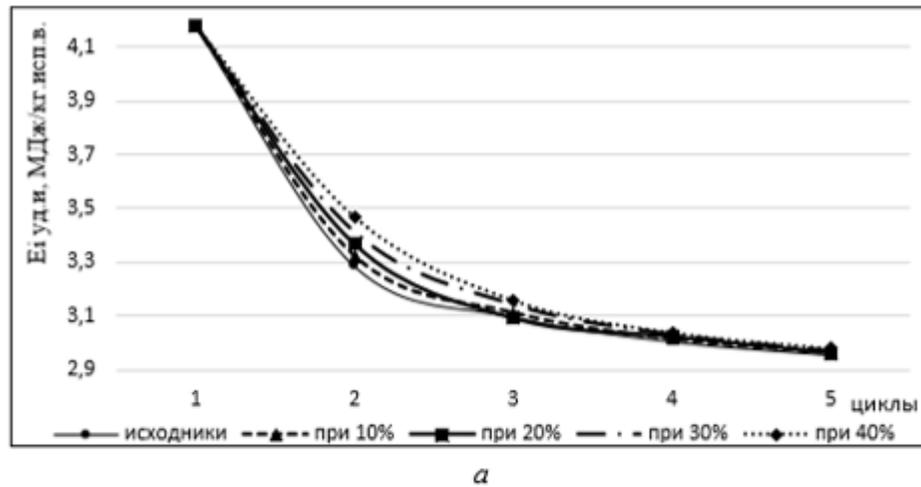


Рисунок А6 – Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 70 °С после 1 цикла сушки между: *а* – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; *б* – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; *в* – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; *г* – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента

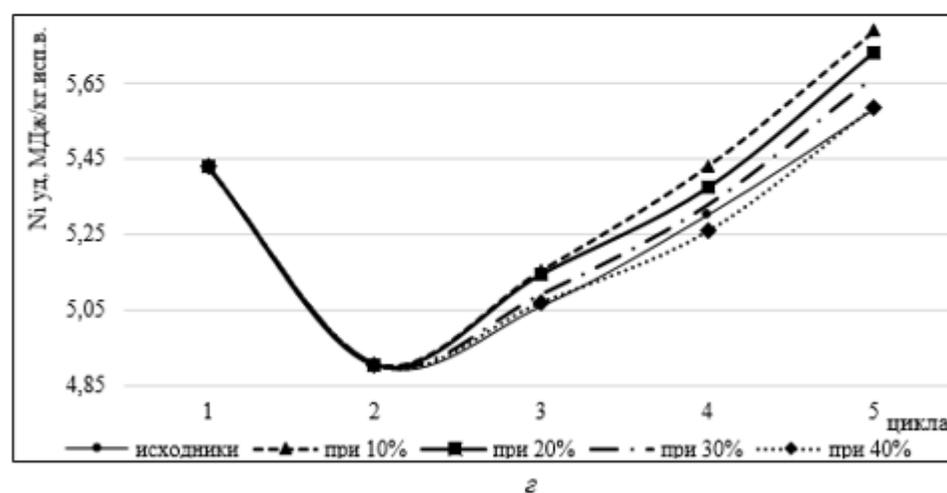
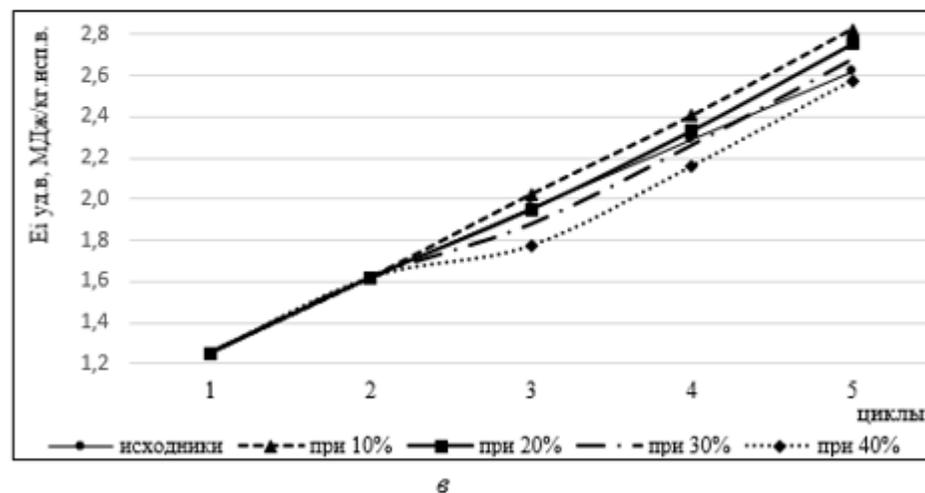
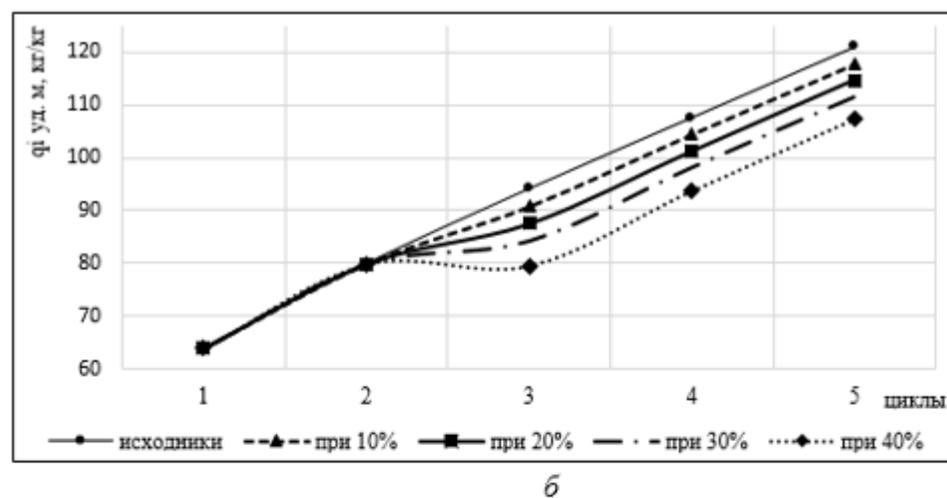
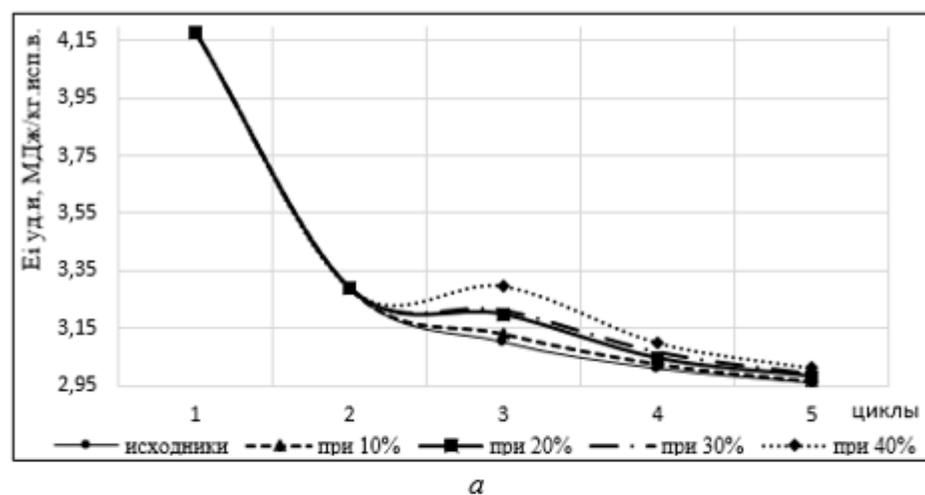


Рисунок А7 – Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 70 °С после 2 цикла сушки между: а – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; б – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; в – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; г – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента

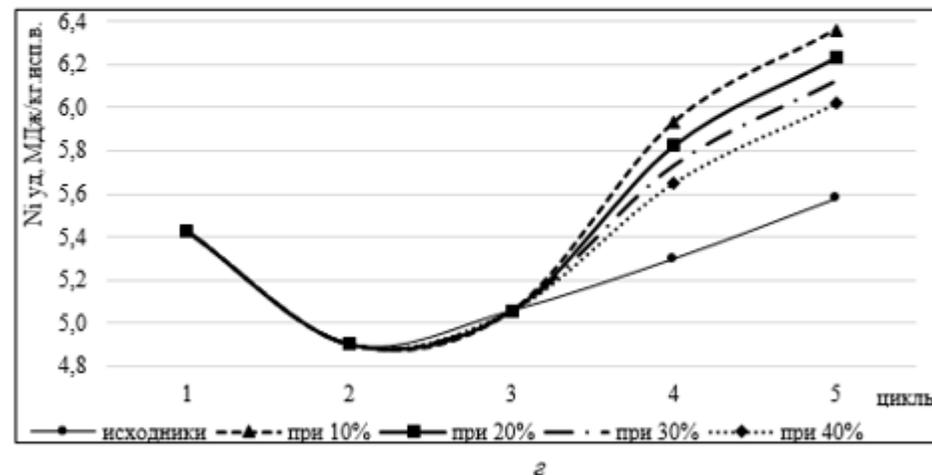
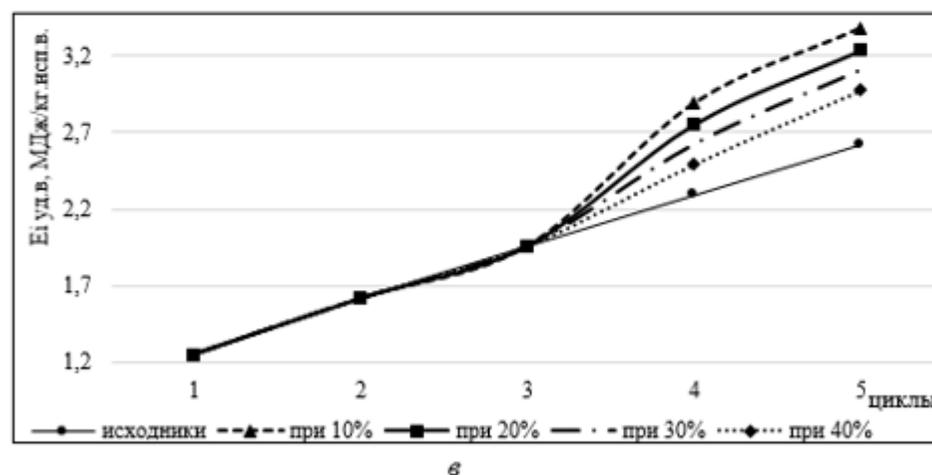
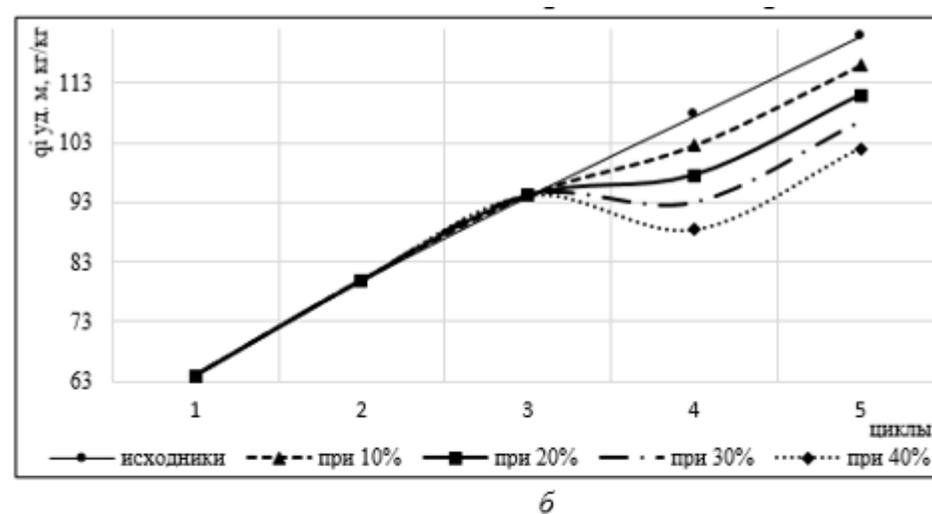
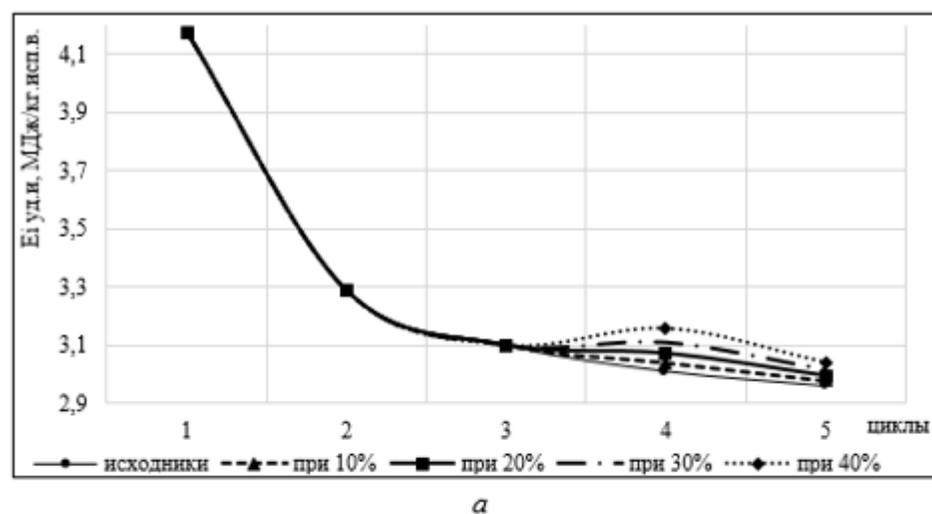


Рисунок А8 – Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 70 °С после 3 цикла сушки между: *а* – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; *б* – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; *в* – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; *г* – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента

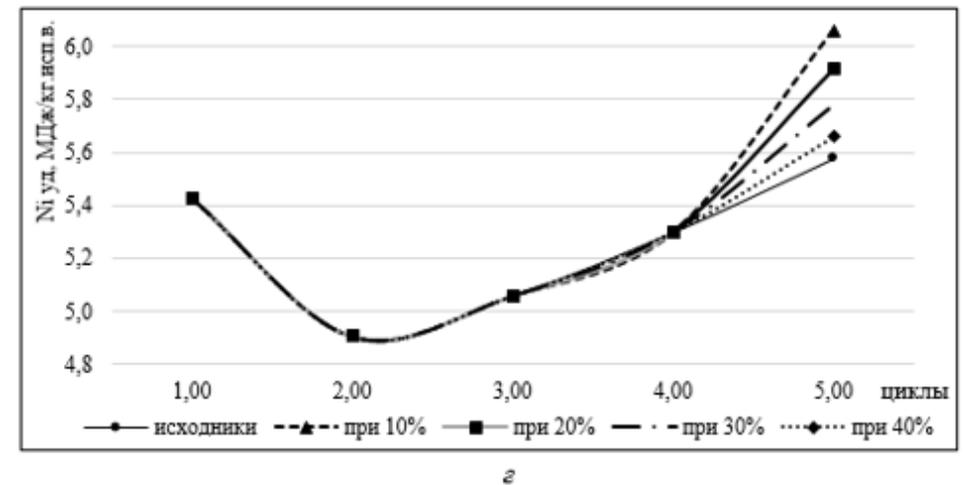
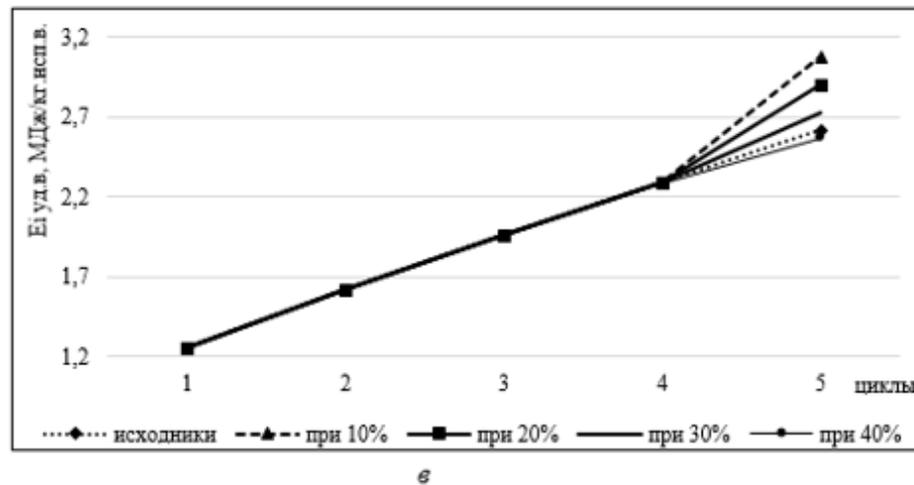
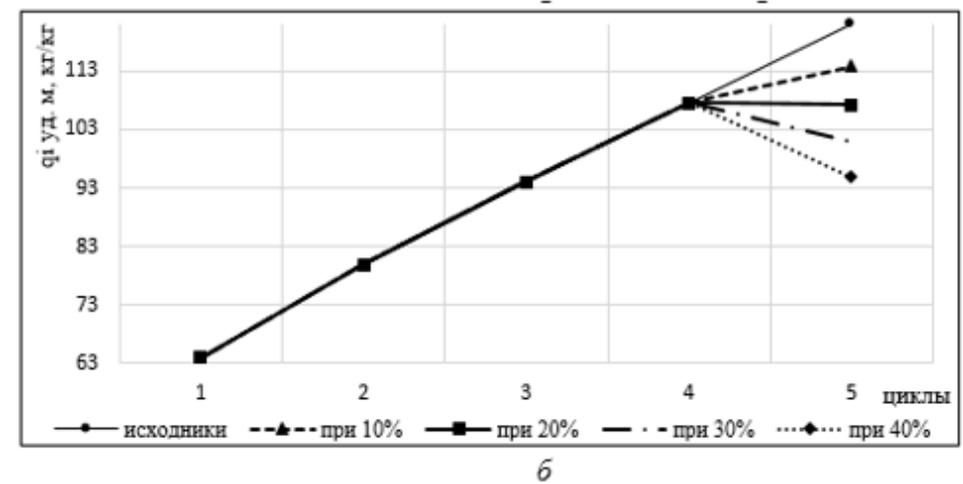
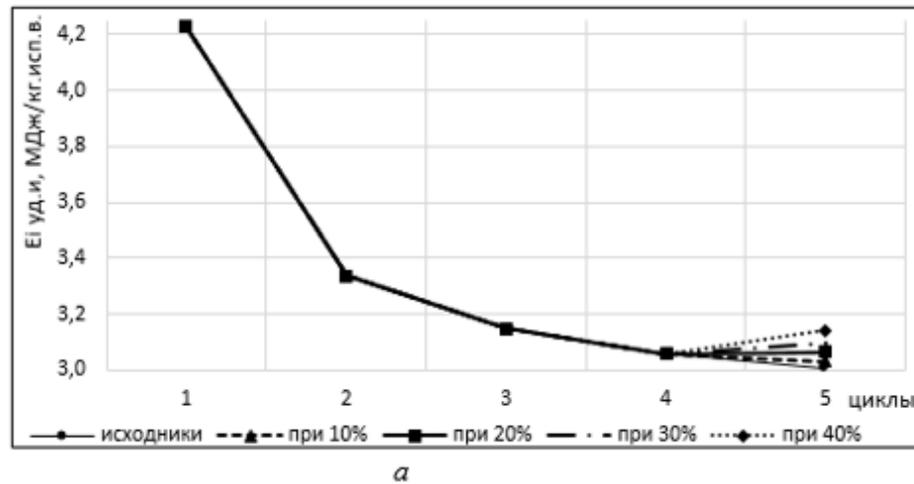


Рисунок А9 – Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 70 °С после 4 цикла сушки между: *а* – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; *б* – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; *в* – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; *г* – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента

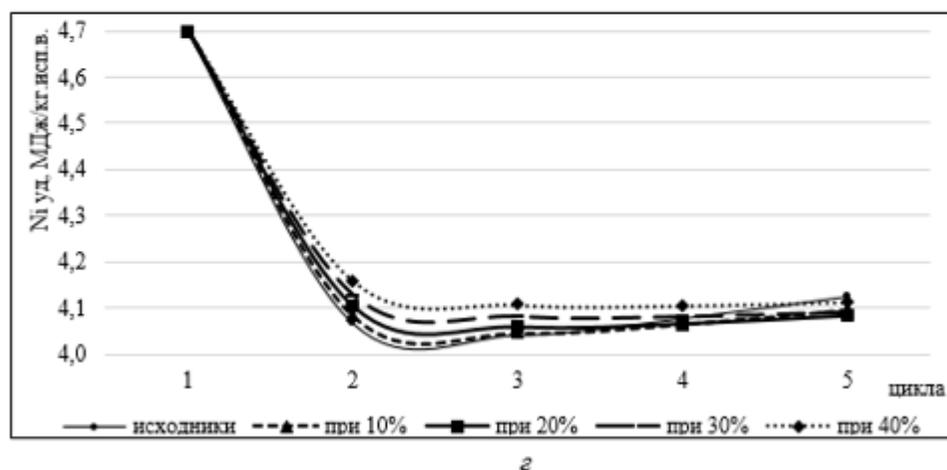
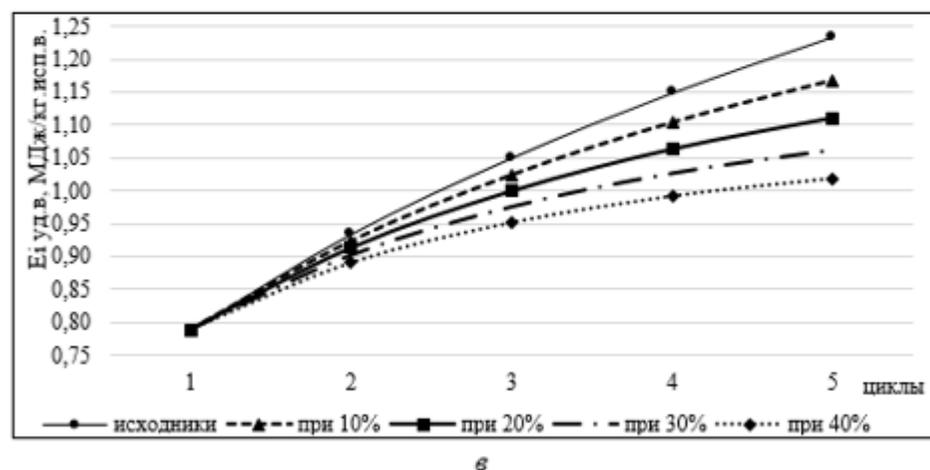
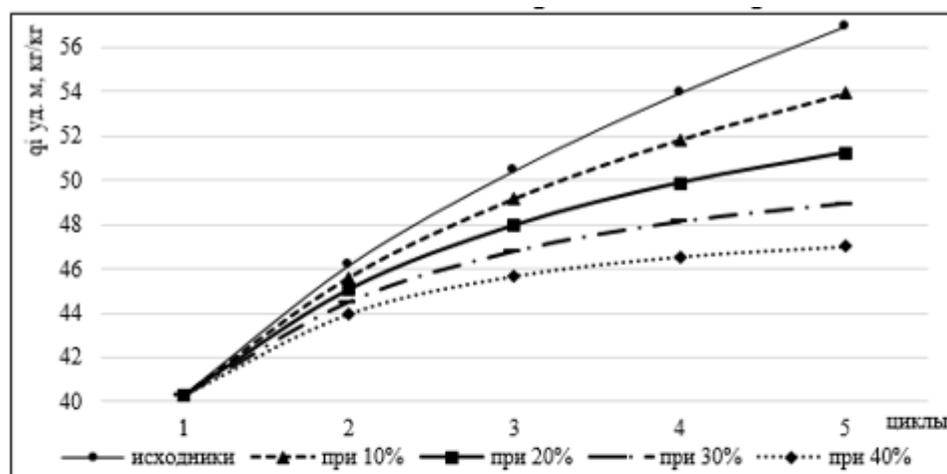
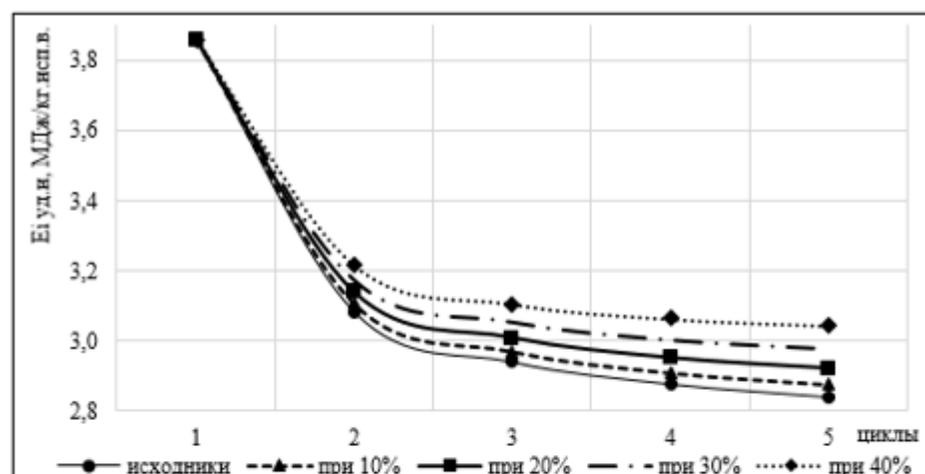
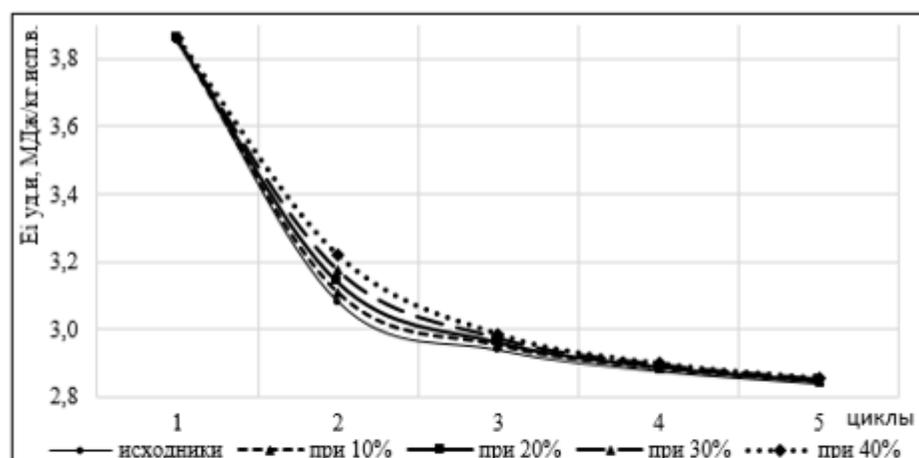
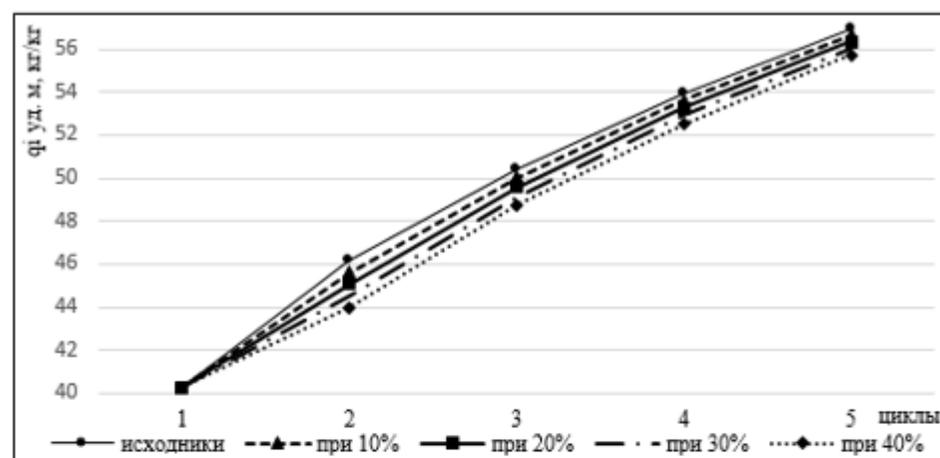


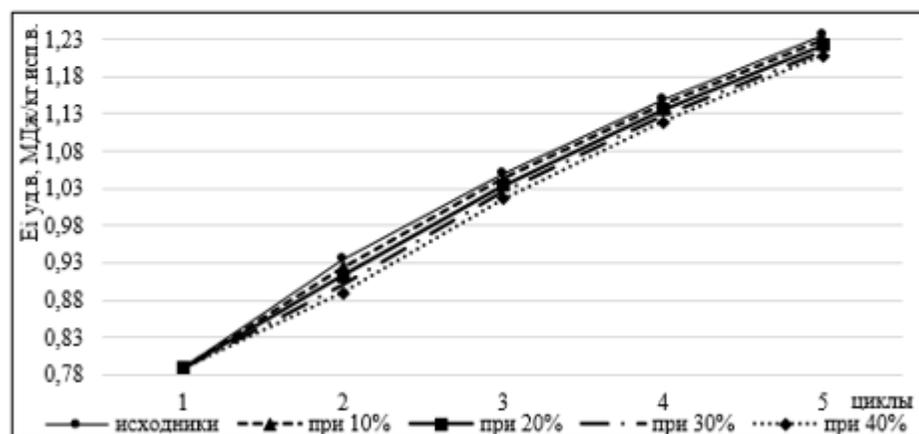
Рисунок А10 – Графические зависимости постоянного подмешивания отработанного агента при 100 °С на каждый цикл сушки между: *а* – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; *б* – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; *в* – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; *г* – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента



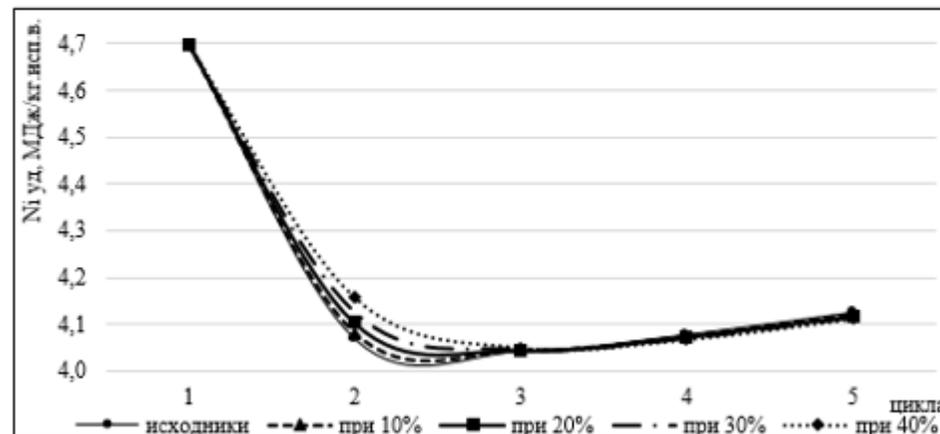
а



б



в



г

Рисунок А11 – Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 100 °С после 1 цикла сушки между: а – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; б – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; в – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; г – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента

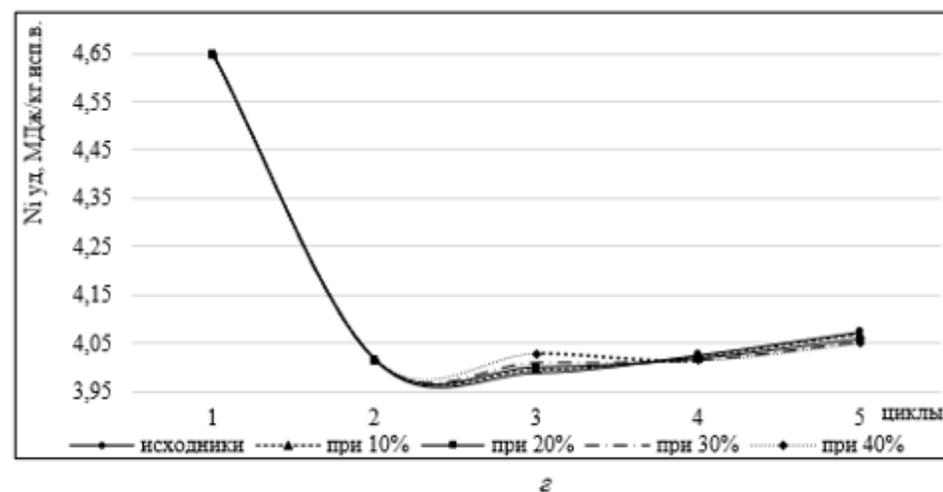
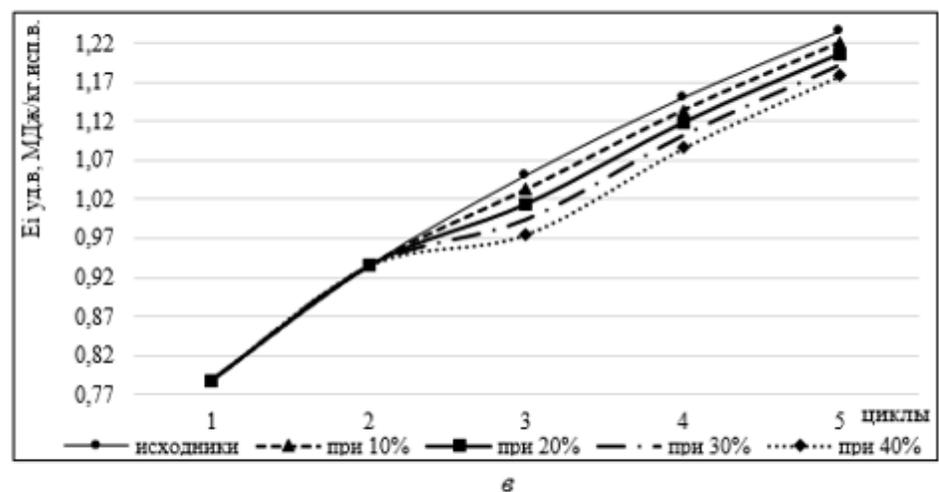
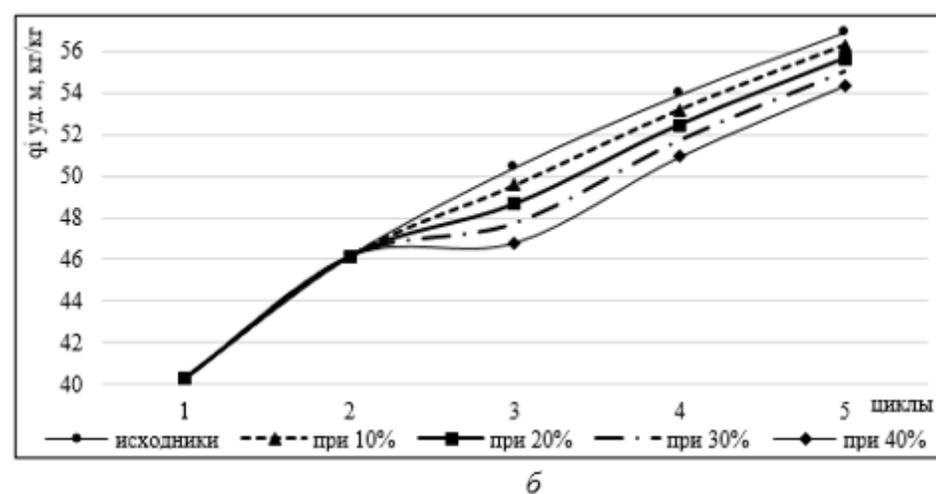
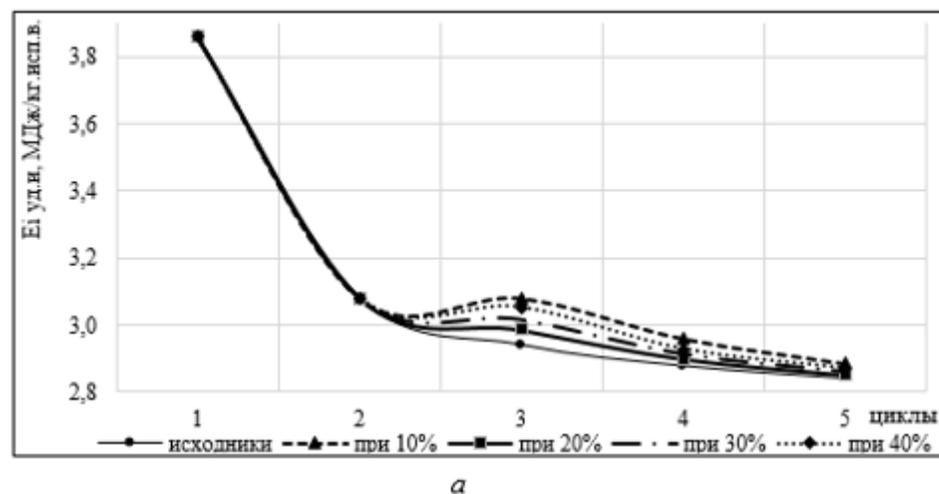
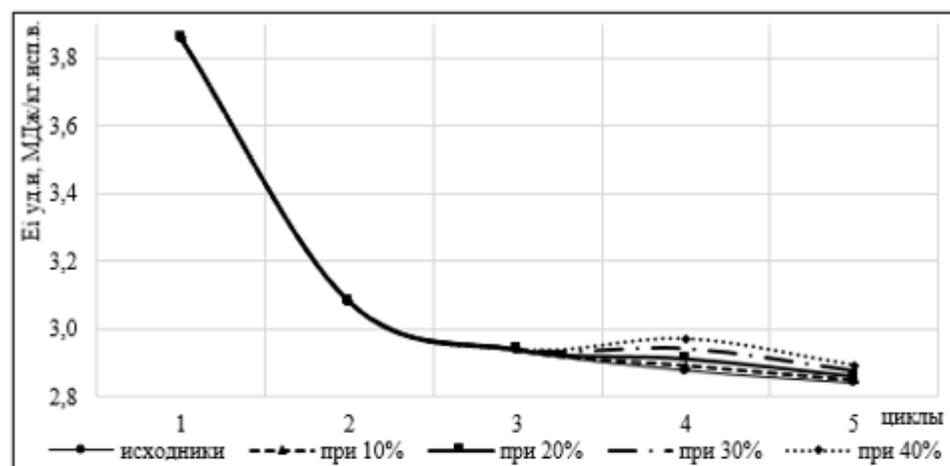
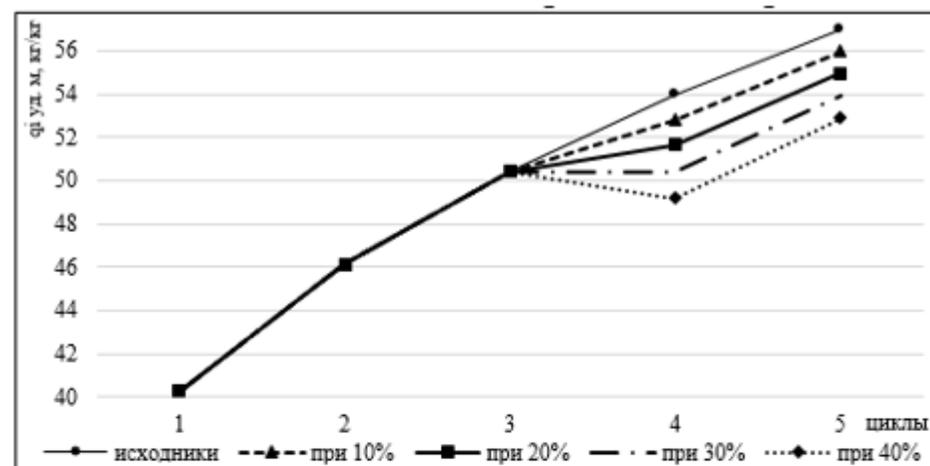


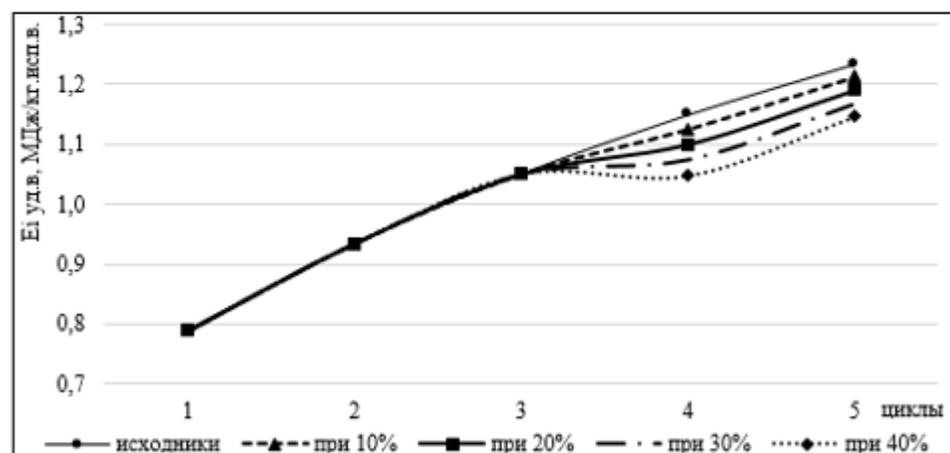
Рисунок А12 – Графические зависимости однократного подмешивания обработавшего агента при 100 °С после 2 цикла сушки между: *а* – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; *б* – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; *в* – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; *г* – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента



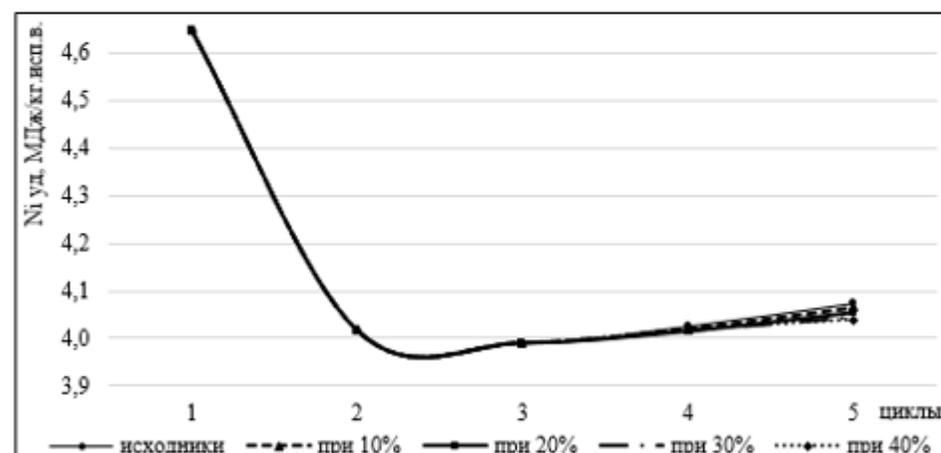
а



б

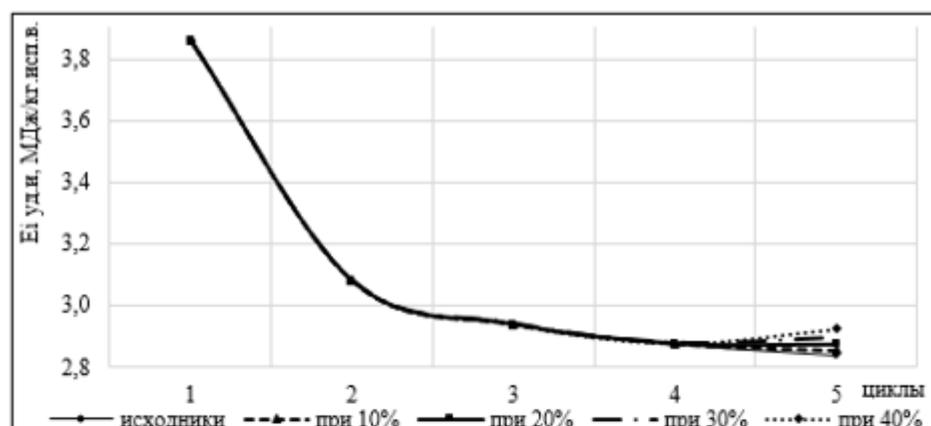


в

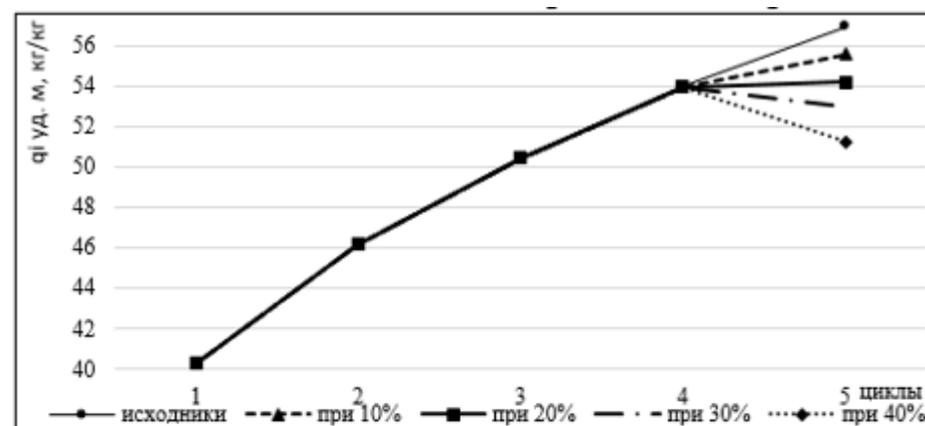


г

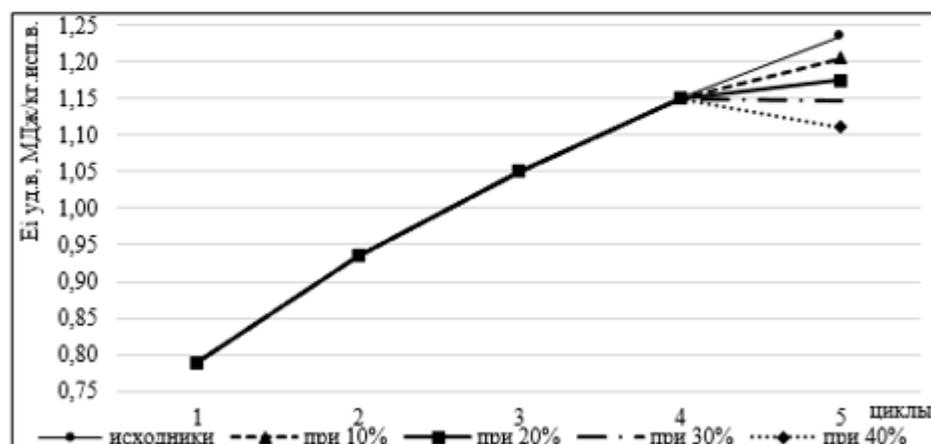
Рисунок А13 – Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 100 °С после 3 цикла сушки между: а – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; б – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; в – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; г – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента



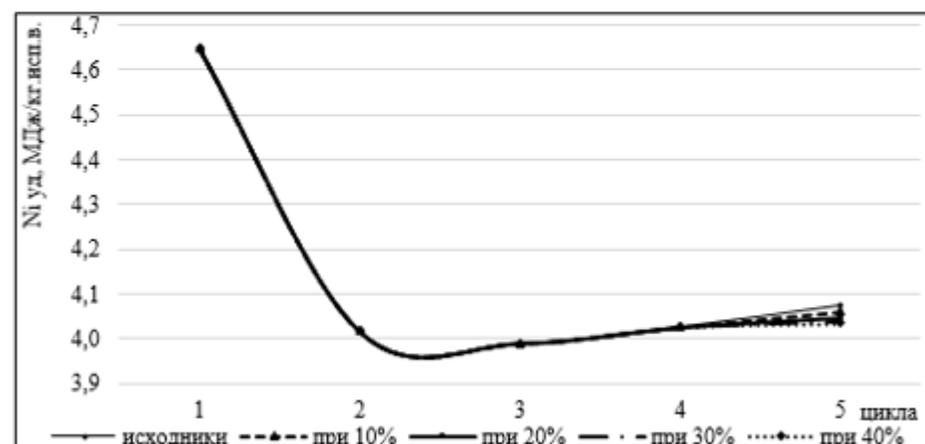
а



б



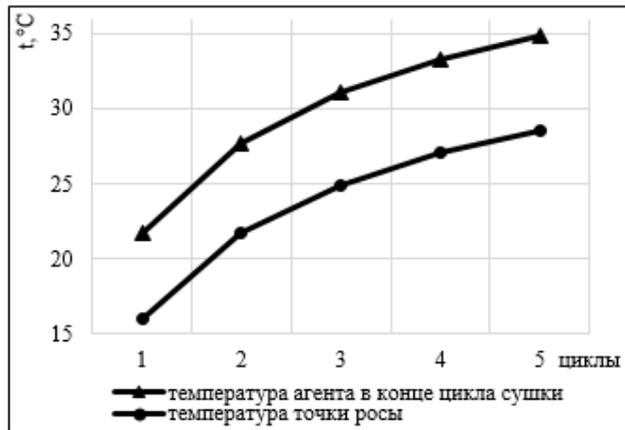
в



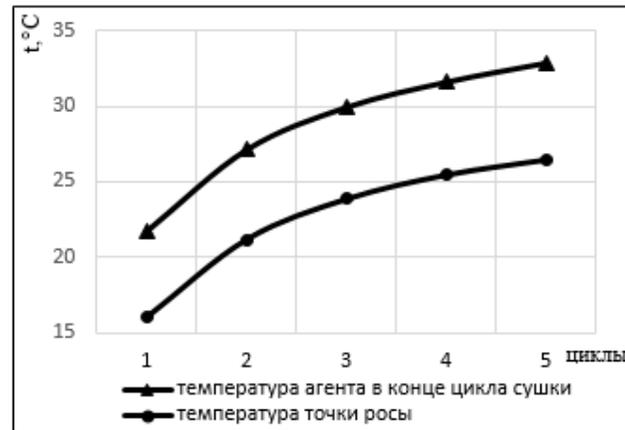
г

Рисунок А14 – Графические зависимости однократного подмешивания отработавшего агента при 100 °С после 4 цикла сушки между: а – расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента; б – удельным расходом энергии и количеством циклов использования сушильного агента; в – удельными энергозатратами на привод вентилятора и количеством циклов использования сушильного агента; г – суммарными удельными энергозатратами и количеством циклов использования сушильного агента

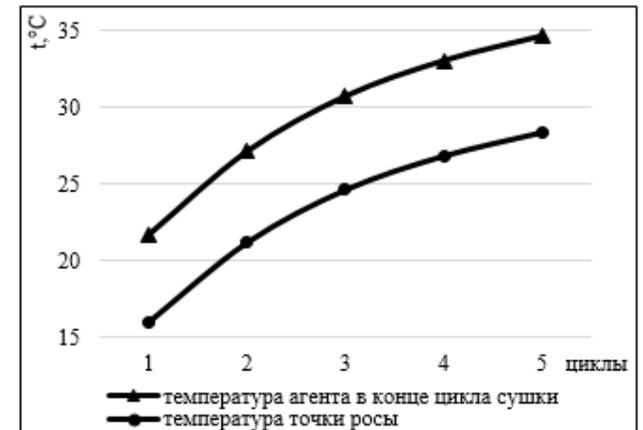
ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(справочное)



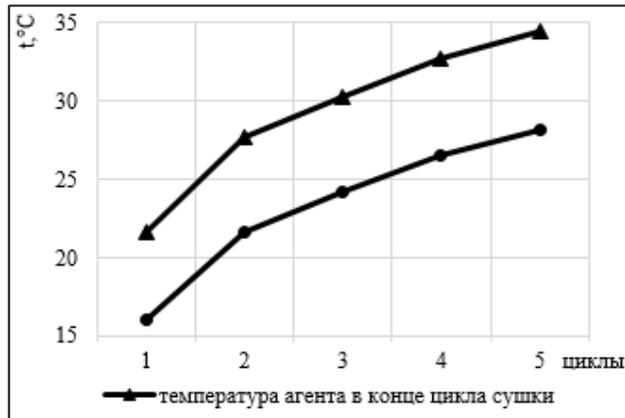
а



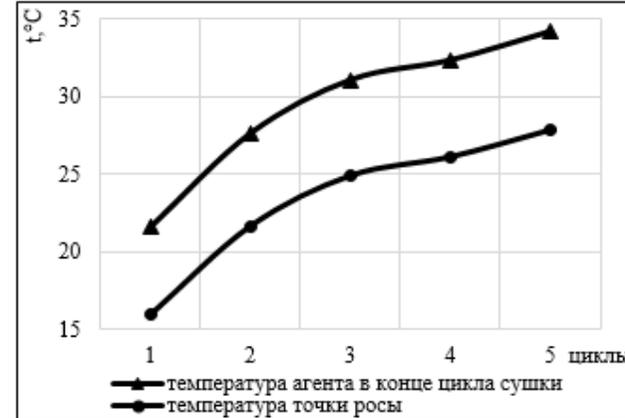
б



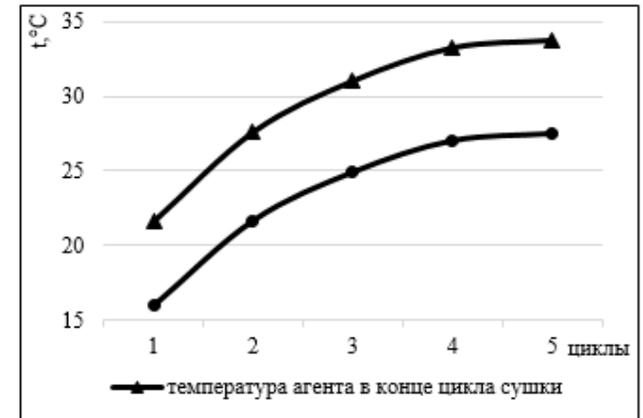
в



г



д



е

Рисунок Б1 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 40°C и подмешивании 10% свежего воздуха: а – клапан-смеситель закрыт; б – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; в – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; г – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; д – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; е – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

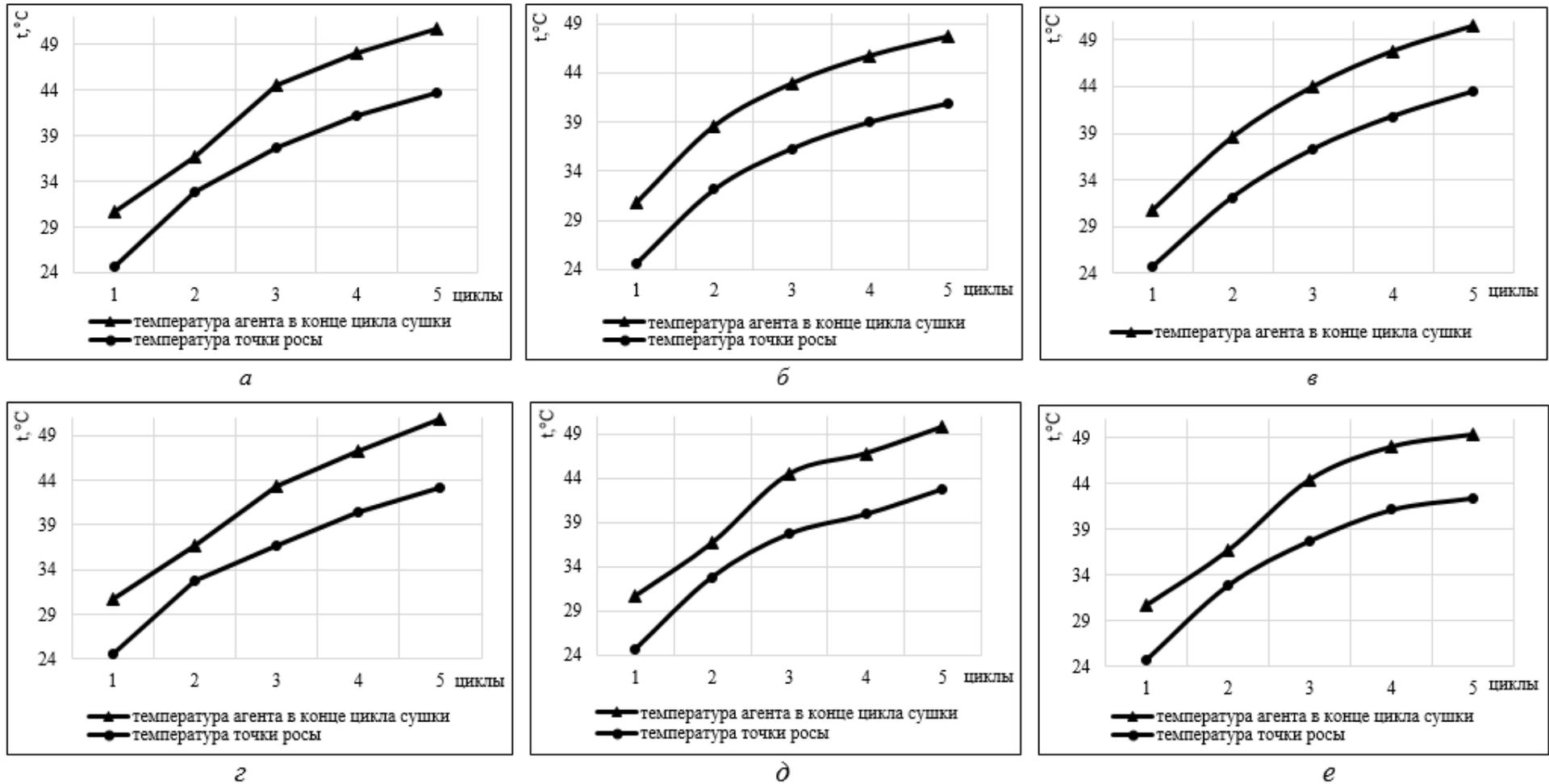


Рисунок Б2 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 70°C и подмешивании 10% свежего воздуха: *а* - клапан-смеситель закрыт; *б* – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; *в* – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; *г* – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; *д* – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; *е* – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

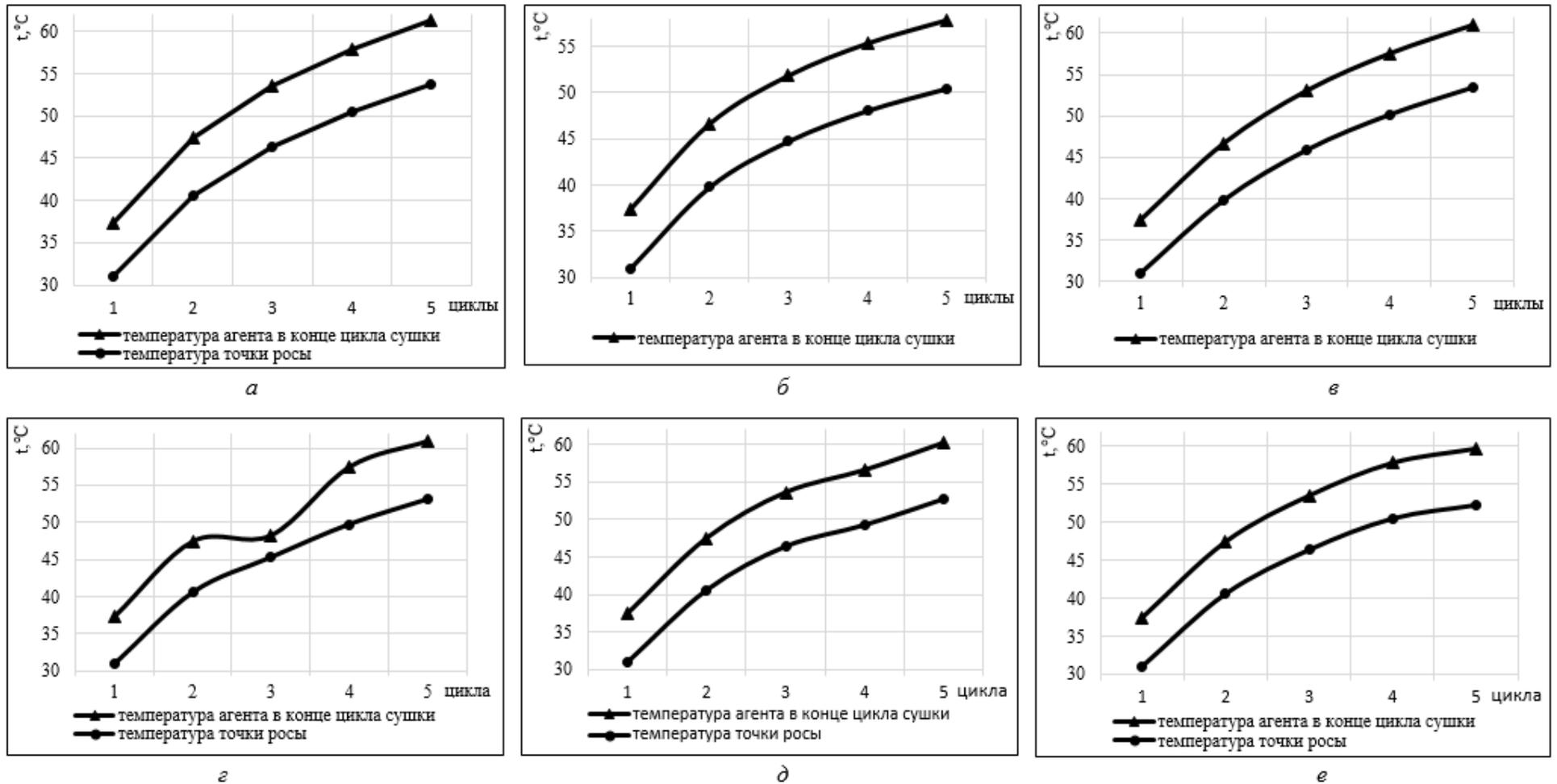


Рисунок Б3 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 100°C и подмешивании 10% свежего воздуха: *а* – клапан-смеситель закрыт; *б* – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; *в* – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; *г* – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; *д* – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; *е* – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

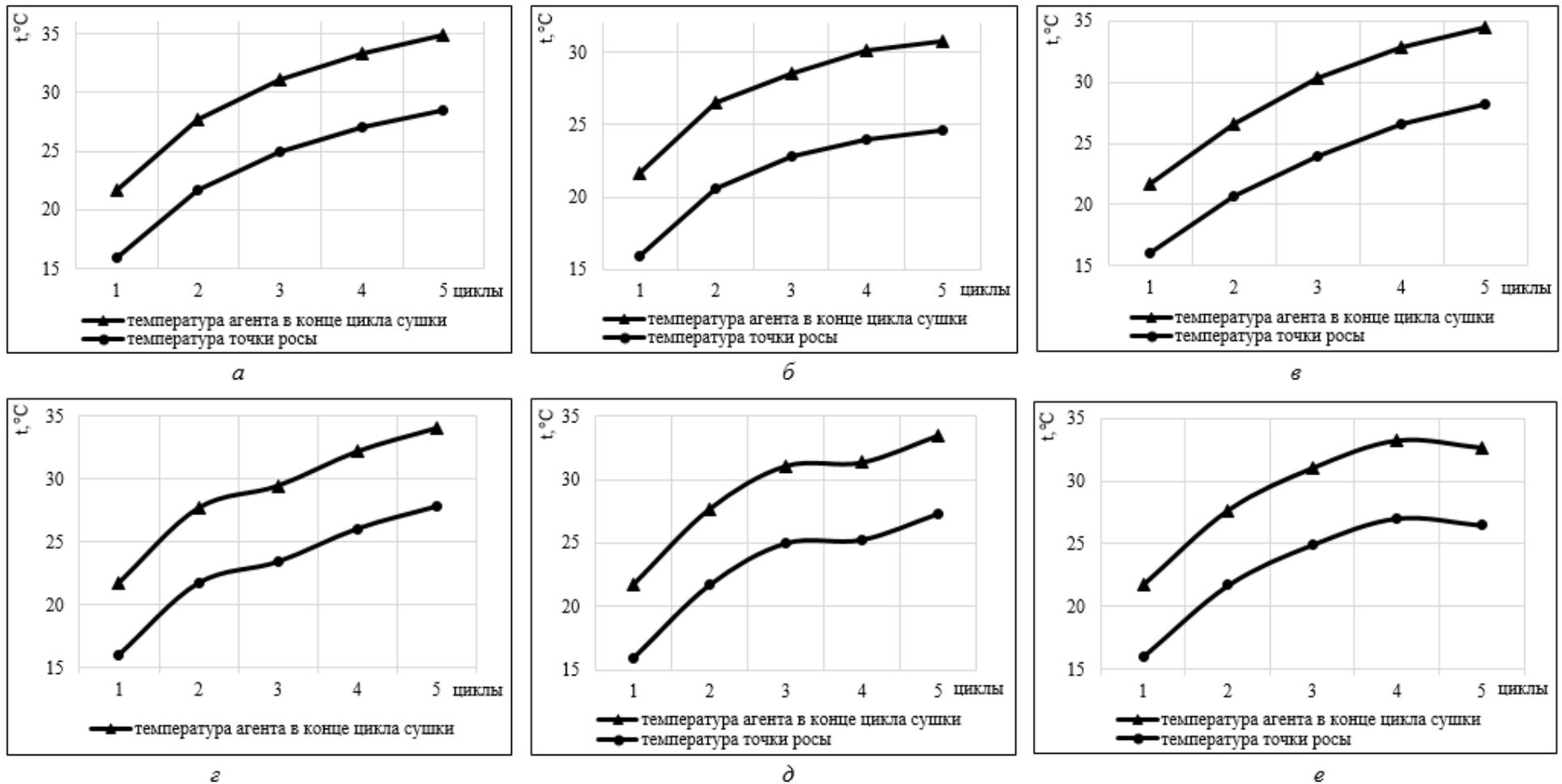
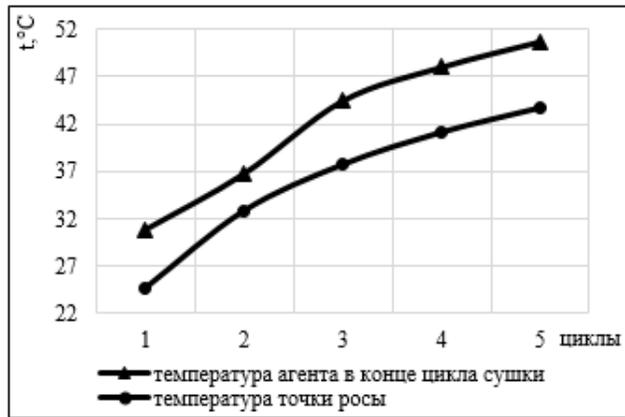
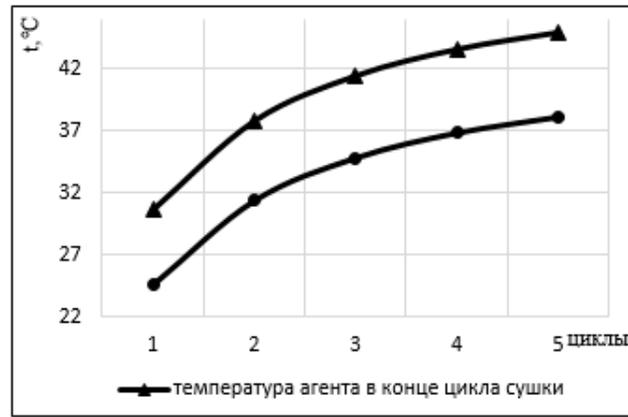


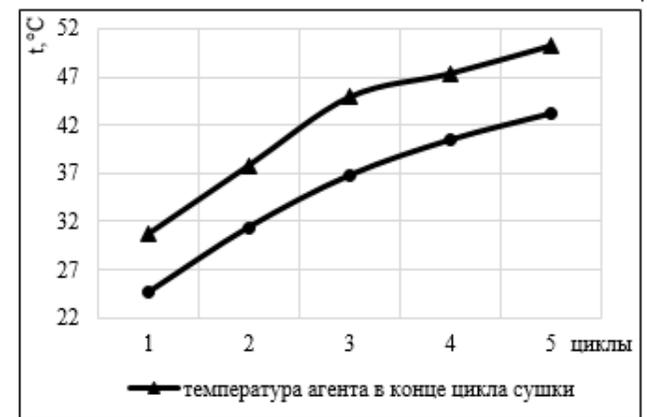
Рисунок Б4 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 40°С и подмешивании 20% свежего воздуха: *a* – клапан-смеситель закрыт; *б* – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; *в* – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; *г* – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; *д* – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; *е* – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.



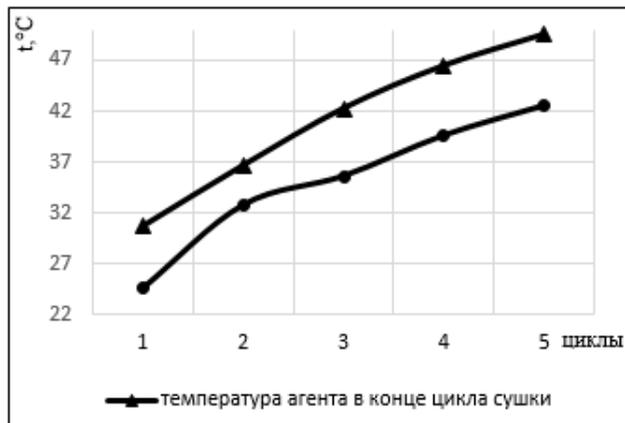
а



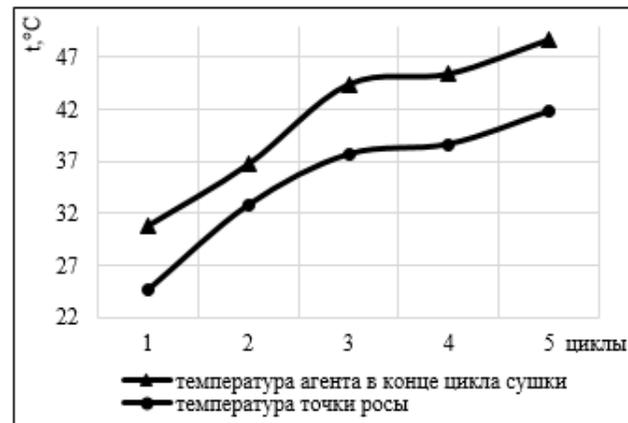
б



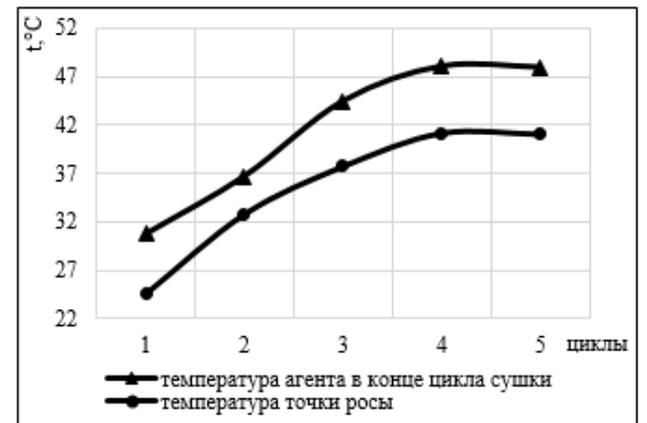
в



г



д



е

Рисунок Б5 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 70°C и подмешивании 20% свежего воздуха: а - клапан-смеситель закрыт; б – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; в – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; г – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; д – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; е – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

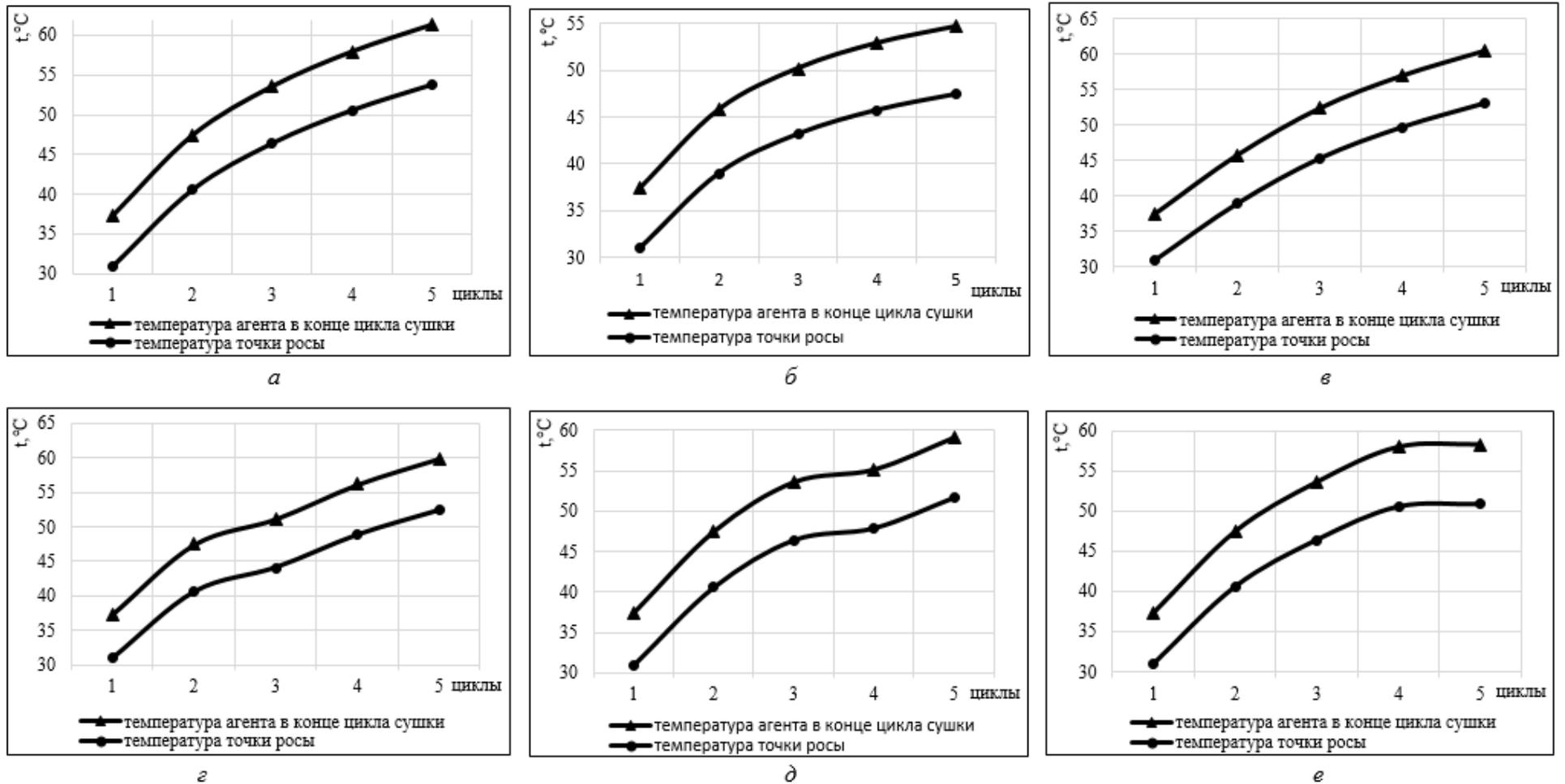


Рисунок Б6 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 100°C и подмешивании 20% свежего воздуха: *a* – клапан-смеситель закрыт; *б* – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; *в* – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; *г* – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; *д* – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; *е* – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

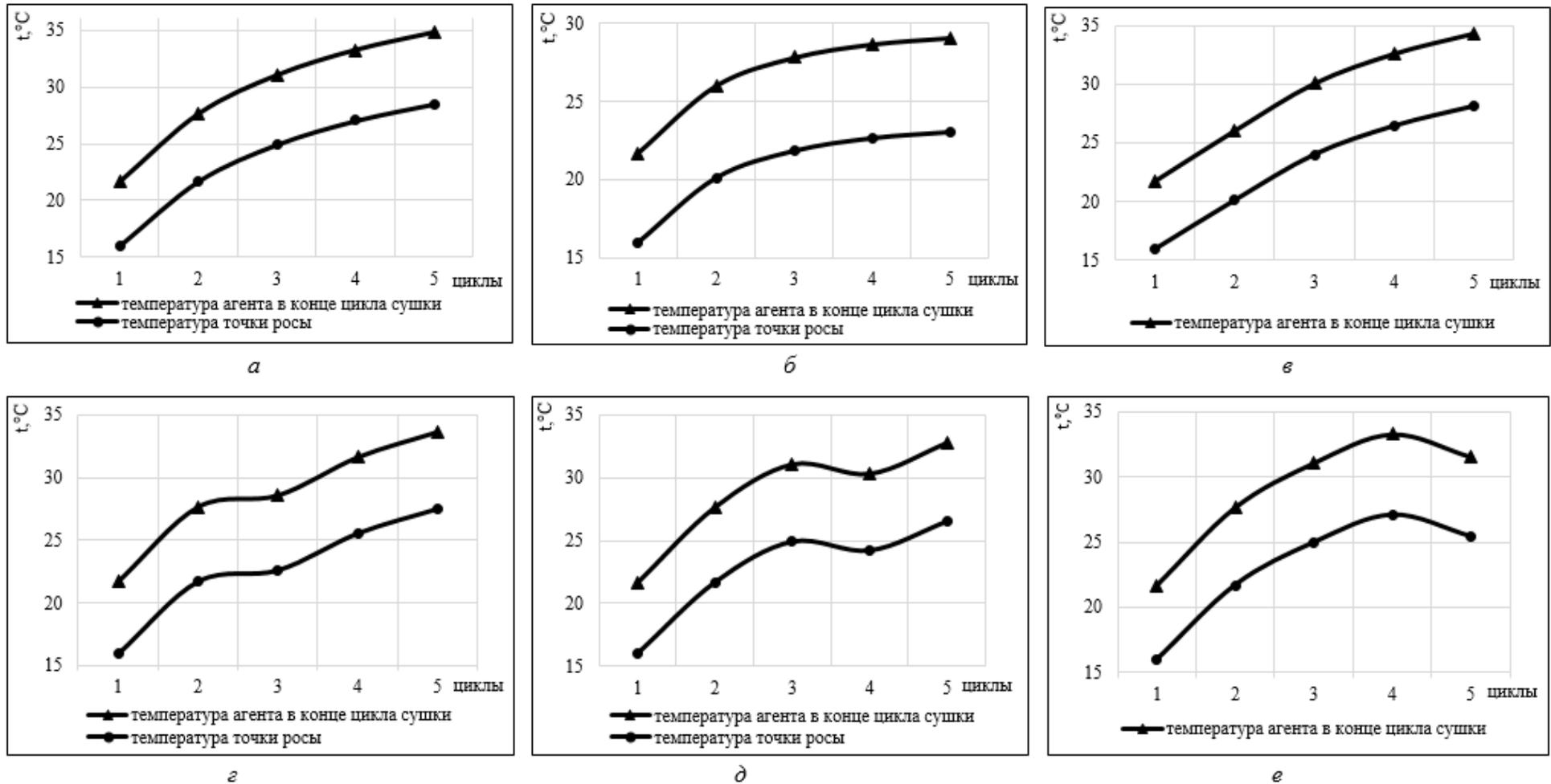


Рисунок Б7 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 40°C и подмешивании 30% свежего воздуха: *a* – клапан-смеситель закрыт; *б* – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; *в*- однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; *г* – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; *д* – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; *e* – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

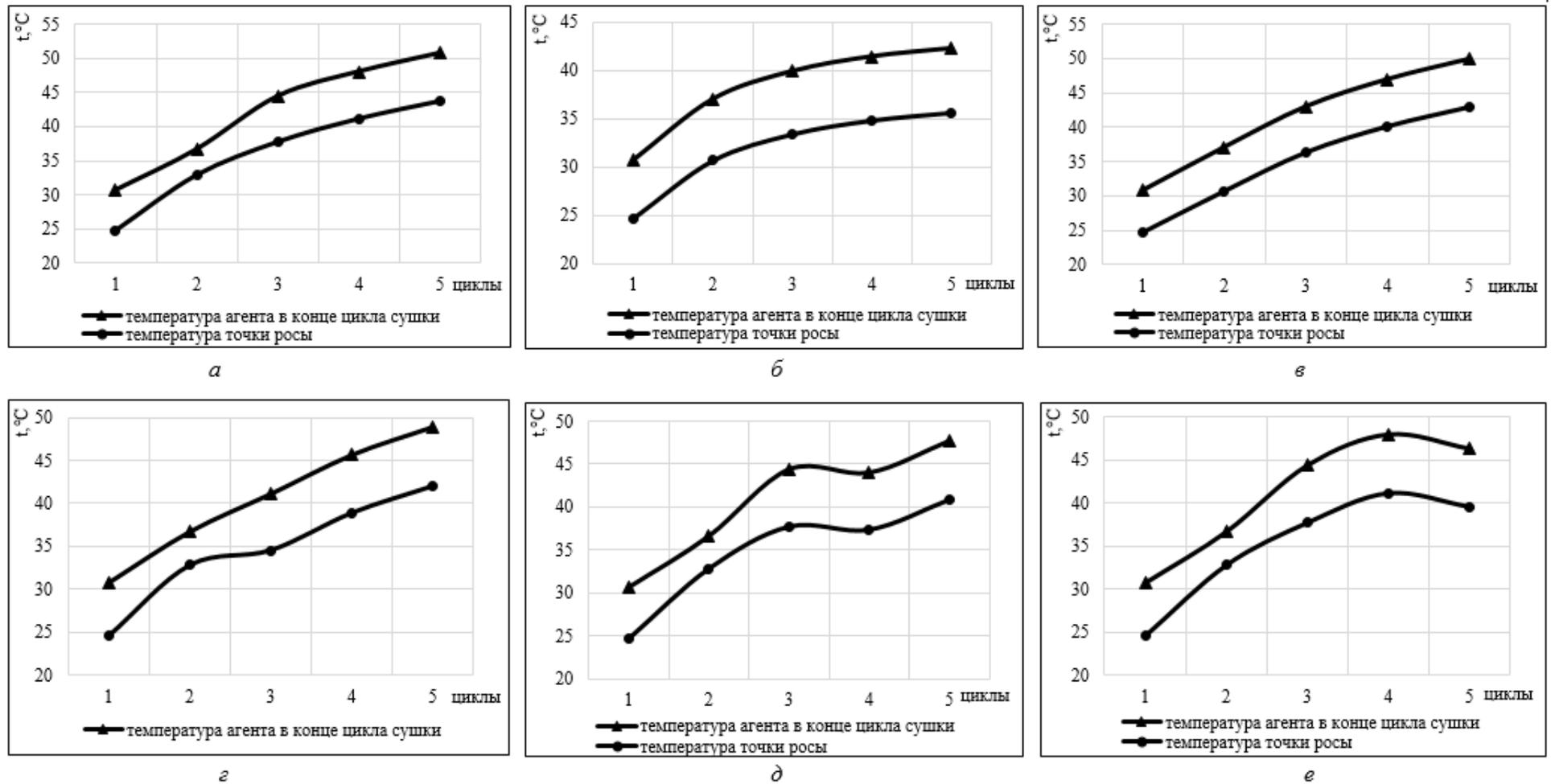


Рисунок Б8 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 70°C и подмешивании 30% свежего воздуха: *a* – клапан-смеситель закрыт; *б* – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; *в* – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; *г* – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; *д* – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; *е* – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

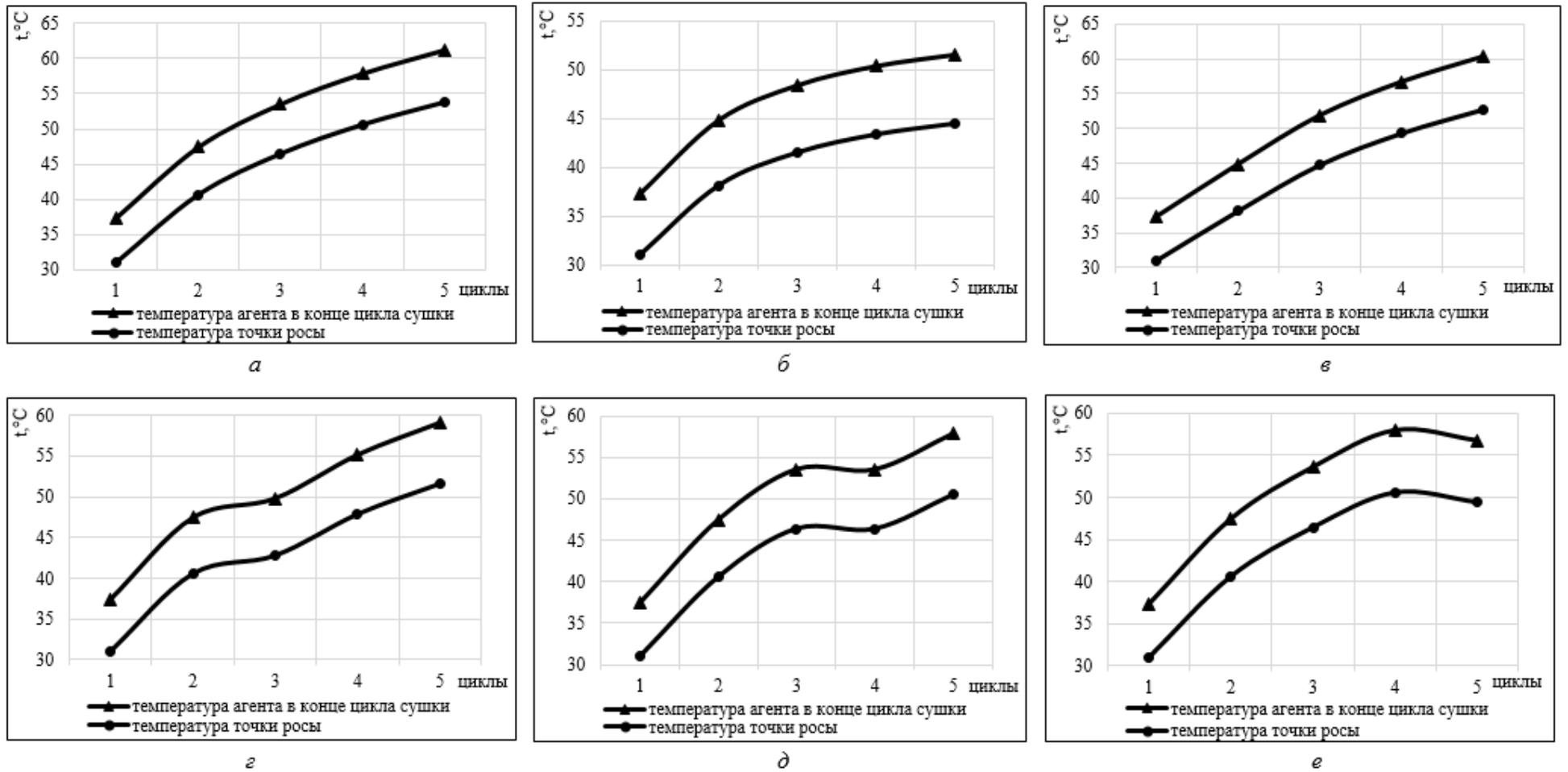


Рисунок Б9 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 100°C и подмешивании 30% свежего воздуха: *a* – клапан-смеситель закрыт; *б* – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; *в* – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; *г* – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; *д* – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; *е* – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

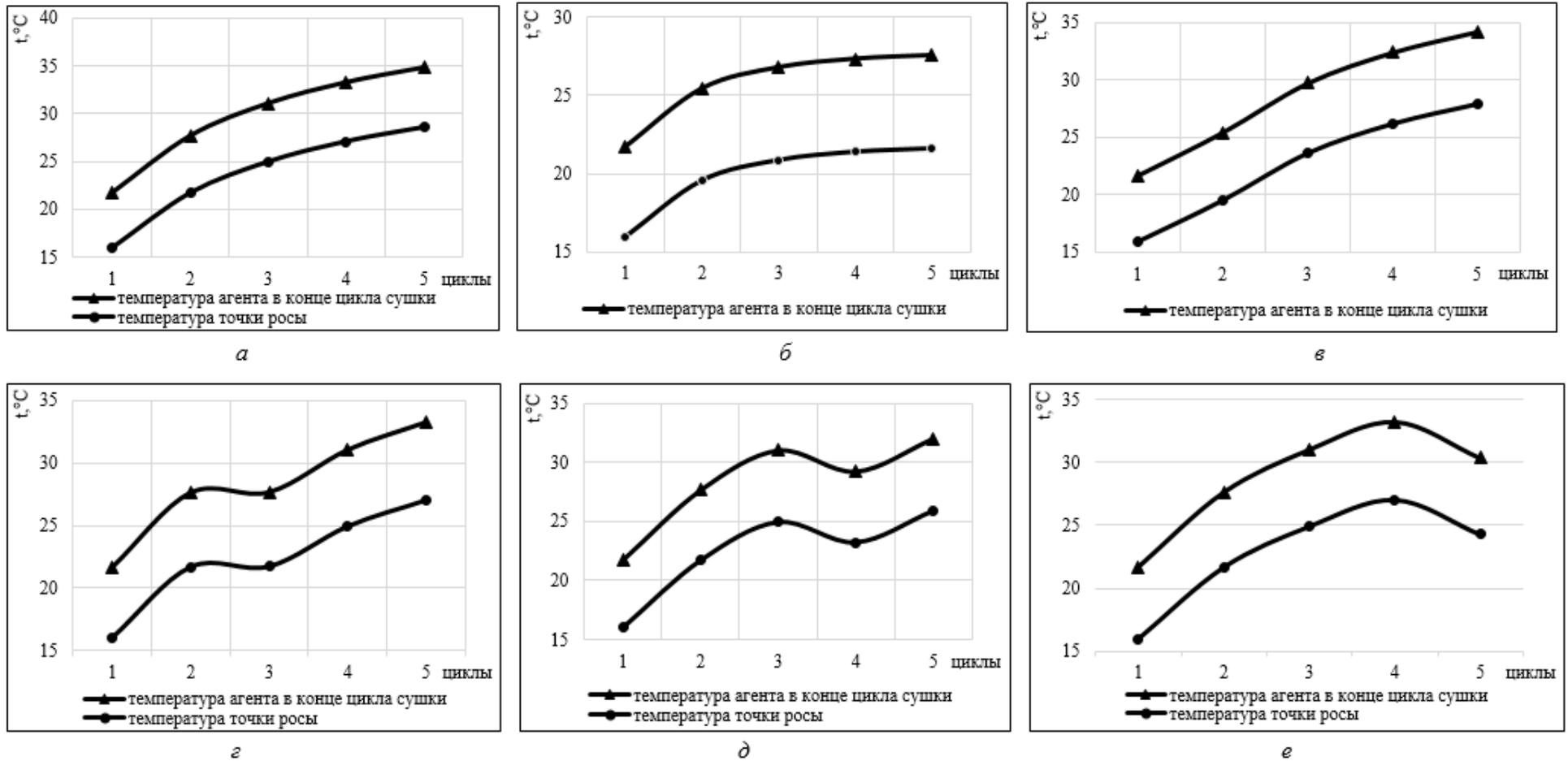


Рисунок Б10 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 40°C и подмешивании 40% свежего воздуха: *a* - клапан-смеситель закрыт; *б* – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; *в* – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; *г* – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; *д* – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; *е* – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

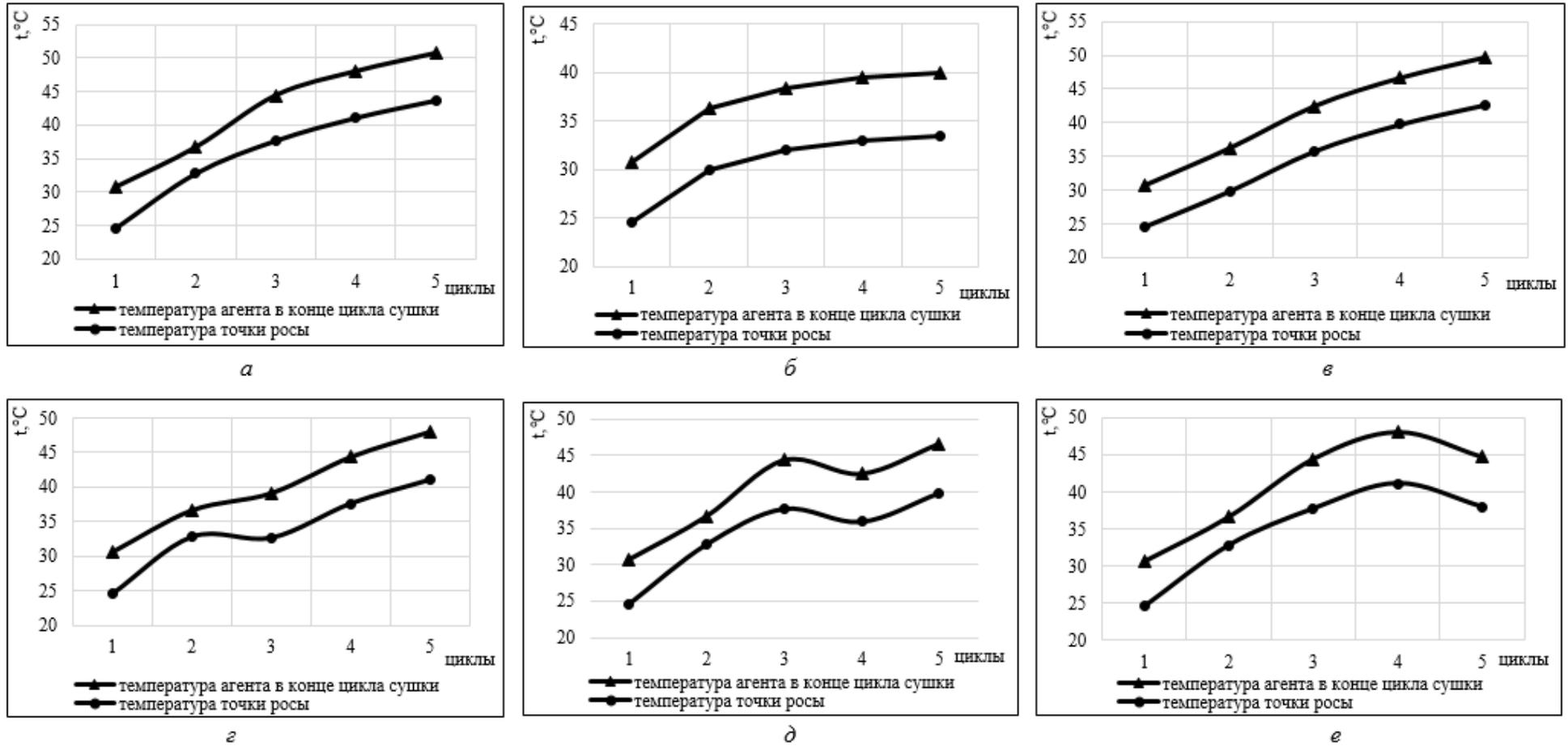


Рисунок Б11 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 70°С и подмешивании 40% свежего воздуха: *a* – клапан-смеситель закрыт; *б* – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; *в* – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; *г* – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; *д* – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; *е* – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

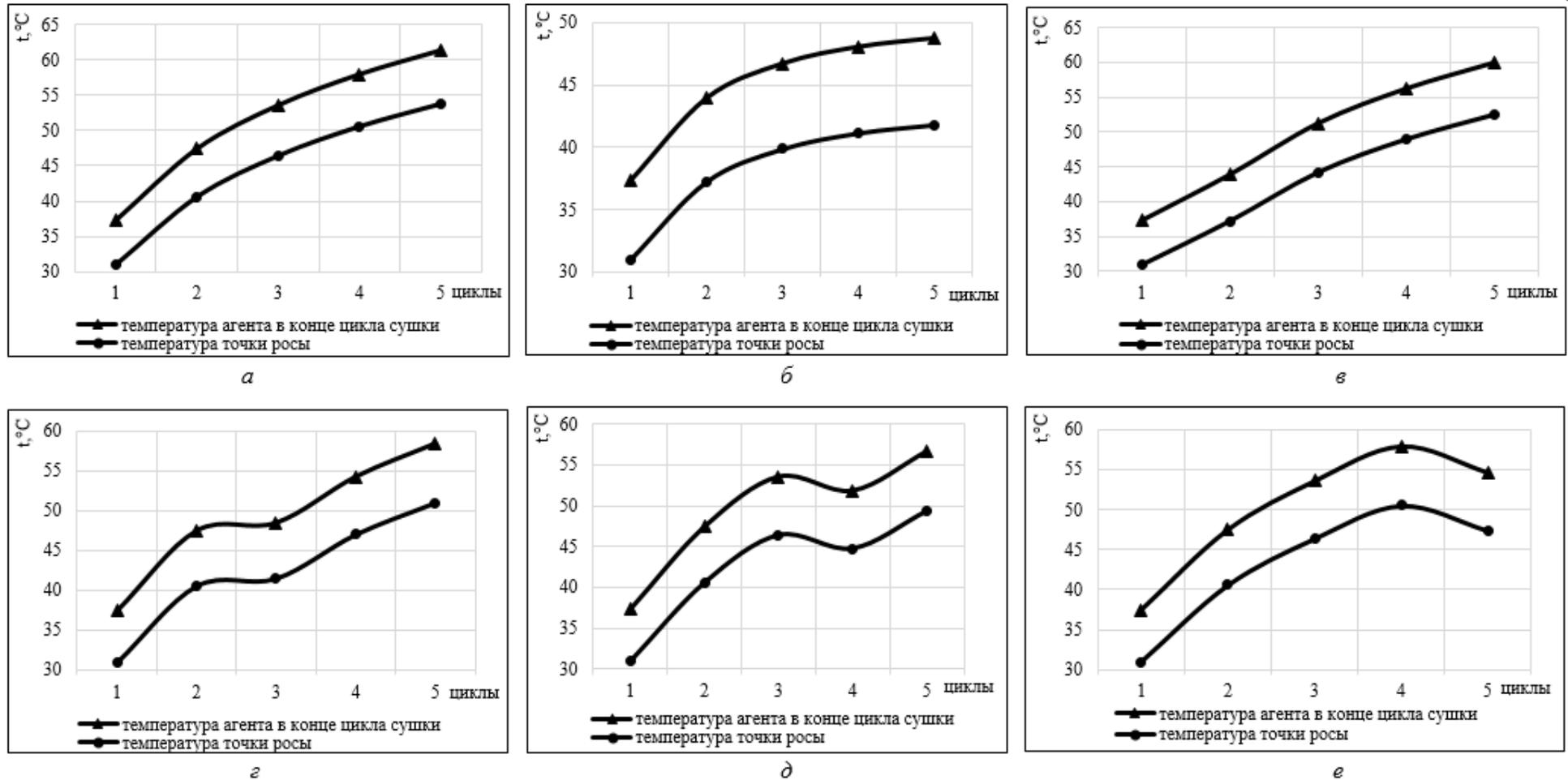


Рисунок Б12 – Графические зависимости температур точки росы и отработавшего агента в конце цикла сушки при 100°C и подмешивании 40% свежего воздуха: *a* - клапан-смеситель закрыт; *б* – постоянное подмешивание свежего воздуха на каждый цикл; *в* – однократное подмешивание свежего воздуха после 1 цикла сушки; *з* – однократное подмешивание свежего воздуха после 2 цикла сушки; *д* – однократное подмешивание свежего воздуха после 3 цикла сушки; *е* – однократное подмешивание свежего воздуха после 4 цикла сушки.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Таблица В1 – Результаты лабораторного исследования определения аэродинамических характеристик в камере сушки зерносушилки

Плоскость замера	Ячейка замера	Положение заслонок (X)		
		45° (засл. откр)	67°	90° (засл. закр)
		Расходы воздуха, Q , м ³ /ч		
А	1	4455	3519	0
	2	4374	3501	0
	3	5643	3762	0
	4	4788	3609	0
	5	3564	2889	0
	6	2268	2088	0
	7	1503	1035	0
	8	1368	1008	0
В	1	5868	3762	990
	2	5625	4005	900
	3	4338	3978	900
	4	3888	3249	1620
	5	2709	2142	990
	6	2601	1539	0
	7	2088	1206	0
	8	1395	1089	0
С	1	6246	4005	1584
	2	4977	4311	1899
	3	3942	3240	2574
	4	3195	2862	1989
	5	2475	2205	1404
	6	2088	1908	1161
	7	1548	1251	0
	8	1368	1179	0

Продолжение таблицы В1 – Результаты лабораторного исследования
определения аэродинамических характеристик в камере сушки зерносушилки

У (решетка)	1	13698	17874	20088
	2	14805	20115	20826
	3	16029	22248	24201
	4	16668	23013	24579
	5	16515	22185	24003
	6	15489	22050	23256
	7	14751	19629	22788
	8	14103	18315	21042
D	1	4311	3474	0
	2	4068	3411	0
	3	4635	3735	0
	4	4275	3069	0
	5	3465	1935	0
	6	2169	1224	0
	7	1359	1008	0
	8	1251	1008	0
E	1	5499	3744	900
	2	4725	3915	900
	3	4086	4032	900
	4	3762	3168	990
	5	2952	2115	990
	6	2277	1638	0
	7	1782	1296	0
	8	1278	1107	0
F	1	5238	4248	1305
	2	5157	4365	1800
	3	4509	2925	1917
	4	4005	2835	1665
	5	3222	2232	1089
	6	1962	1872	1071
	7	1035	990	0
	8	990	900	0
Среднее значение расхода воздуха, м ³ /ч		5042.571	5161.018	3755.732

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(справочное)

Таблица Г1 – Техничко-экономические показатели современных передвижных зерновых сушилок [16]

Серия и модель	Тип сушилки	Производительность, т/ч	Установленная мощность, кВт	Удельная металлоемкость, (т·ч) / тл. т	Удельная стоимость сушилки, (млн. руб·ч.) / тл. т	Удельный расход топлива, л (при снижении на 1 %)	*Удельный расход теплоты, расчетный, (МДж·ч) / кг. исп. вл.	*Комплексный показатель совершенства конструкции сушилки, (МДж·т·ч ²) / (тл. т · кг. исп. вл.)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
«Мери», Финляндия								
М 180к	Шахт-ный	3,44	17,5	1,45	0,935 [73]	1,19	3,75	5,44
М 205к	-"	3,86	19	1,55	1,045 [73]	1,19	3,75	5,81
М 240к	-"	4,5	21	1,56	-	1,19	3,75	5,85
М 300к	-"	5,8	28	1,12	-	1,19	3,75	4,2
Одесский завод продовольственного машиностроения, Украина								
К4-УС2-А	-"	10	37	1,02 [34, 36]	-	-	4,48	4,57
«Riela», Германия								
Серия GDT	-"	5,18– 17,76	18–37	–	0,81 [131]	1,05 [88]	3,31	–
Серия GTR	Бун-кер.	2,29– 5,55	22	–	0,73 [8]	1,2–1,5 [35]	3,78–4,72	–
Agrex», Италия								
Серия PRT	-"	1,95– 10,25	22,5– 50	1,02– 0,65	2,61–0,49 [62]	1,05 [125]	3,47	3,54-2,26
«Fratelli Pedrotti», Италия								
Серия Basic	-"	2,07– 4,79	22,5– 30	1,49– 0,65	1,24–0,73 [67, 68]	1[22]	3,15	4,69-2,05
Серия Super	-"	2,67– 5,36	23–30	1,40– 0,76	1,21–0,78 [63, 71]	1[22]	3,15	4,41-2,39
Серия Large	-"	5,78– 8,65	35–45	0,58– 0,29	1–0,68 [64, 65]	1[22]	3,15	1,83-0,91
Серия XL	-"	9,24– 14,3	75–90	0,82– 0,55	0,68–0,67 [66, 71]	–	–	–

Продолжение таблицы Г1 – Техничко-экономические показатели современных передвижных зерновых сушилок [16]

«Месмар», Италия								
Серия СРТ	-"	5,54–7,08	22	0,69–0,54	0,64–0,81 [38]	1[37]	3,15	2,17-1,70
Серия STR	-"	7,39–10,47	30	0,81–0,57	0,49–0,35 [38]	1[37]	3,15	2,55-1,80
Серия FSN	-"	4,93–12,32	30	1,17–0,47	0,77–0,36 [38]	1,1[37]	3,47	4,06-1,63
Серия D	-"	11,7–17,25	30–45	–	0,51–0,22 [38]	–	–	–
Серия SSI	-"	14,78–20,64	45–55	–	0,31[84]	–	–	–
Серия S	-"	24,64–38,2	75–100	–	0,27[84]	–	–	–
ОАО «УКХ «Бобруйскагромаш», Республика Беларусь								
СЗП-32	-"	12	60	0,36	-	1,36 [105]	4,29	1,54
ОЭЗ «Триумф»								
СМС-8	-"	8	27,5	0,94	0,311 [85]	1,17 [106]	3,69	3,47
«GT Mfg.», США								
RB 300	-"	5,16	14,9	0,34	–	–	–	–
RB 500	-"	7,31	18,6	0,32	–	–	–	–
RB 600	-"	8,73	22,3	0,29	–	–	–	–
RB 800	-"	10,75	30	0,26	–	–	–	–
Компания «АгроТехМаш»								
Серия АТМ	-"	1,72–10,73	37,6–114,6	–	1,4–0,68 [33, 69]	1–1,5 [39]	3,15–4,73	–
Группа компаний «АгроТех»								
Гулли-вер-12	-"	7,83	22	0,51	0,345 [70]	1,92 [61]	6,05	3,09
ЗАО «СКБ по сушилкам «Брянксельмаш»								
СПК-2,5	Колон-ковый	2,5	–	1,32	1,063 [108]	0,8 [107]	2,52	3,33
«TURBODAN», Дания								
TD 15	Напол-ный	13,05	–	0,68	0,4 [75]	1,1 [74]	3,47	2,36
TD 18	-"	15,66	–	0,61	0,42 [75]	1,1 [74]	3,47	2,12
TD 25	-"	21,75	–	0,68	0,385 [75]	1,1 [74]	3,47	2,36

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(справочное)

Таблица Д1 – Значения расхода воздуха, прошедшего через материал

	Зонт от- крыт	Л-без си- стемы ре- цирк.	Кл. за- крыт	Л- закр.кл	10% подм.	Л-10%	20% подм	Л-20%	Смена агента	Л-смена агента
1.	12,5	11250	12,3	11070	13,3	11970	13,2	11880	11,3	10170
2.	10,7	9630	10,5	9450	11,2	10080	12,1	10890	10,7	9630
3.	10	9000	10,6	9540	11	9900	11,9	10710	10,7	9630
4.	10,7	9630	10,8	9720	11,2	10080	11,4	10260	11,8	10620
5.	8,8	7920	7,8	7020	8,6	7740	8,9	8010	9,2	8280
6.	7,7	6930	6,1	5490	7	6300	7,7	6390	6,9	6210
7.	8	7200	7	6300	8,2	7380	7,6	6840	8	7200
8.	6,4	5760	6,7	6030	7,8	7020	7,7	6930	7,6	6840
9.	12,6	11340	12,2	10980	13,8	12420	13,3	11970	13,2	11880
10.	10,7	9630	11,1	9990	13,2	11880	12,7	11430	11,1	9990
11.	11,4	10260	11,2	10080	11,5	10350	11	9900	11,3	10170
12.	10,5	9450	11,9	10710	11,9	10710	11,7	10530	11,9	10710
Ср. знач.		9000		8865		9652,5		9690		9277,5
Скорость фильтра- ции		0,1667		0,1642		0,1788		0,1794		0,1718

Таблица Д2 – Статистические характеристики расхода отработанного агента сушки после прохождения через материал на поверхности зерна по длине камеры сушки на разных режимах работы системы рециркуляции аэродинамического устройства для сушки зерна [20]

Показатели	Левая сторона					Центральная часть					Правая сторона				
	Без зонта	Кл. закрыт	10%	20%	Смена агента	Без зонта	Кл. закрыт	10%	20%	Смена агента	Без зонта	Кл. закрыт	10%	20%	Смена агента
Сумма квадратов отклонений, $\Sigma(Y_i - Y_{cp})^2$	2776275	1644300	2873475	1401300	686475	2419875	1215000	1134000	929475	2257875	2187000	696600	2835000	2549475	2176875
Дисперсия S, м3/ч	925425	548100	957825	467100	228825	806625	405000	378000	309825	752625	729000	232200	945000	849825	725625
Среднее квадратичное отклонение σ , м3/ч	961,99	740,34	978,69	683,45	478,36	898,12	636,40	614,82	556,62	867,54	853,81	481,87	972,11	921,86	851,84
Коэффициент вариации v , %	9,74	7,44	9,31	6,25	4,78	12,92	10,25	8,65	7,76	12,16	8,40	4,62	8,57	8,41	7,97

Таблица ДЗ – Статистические характеристики расхода отработанного агента сушки после прохождения через материал на поверхности зерна по ширине камеры сушки на разных режимах работы системы рециркуляции аэродинамического устройства для сушки зерна

Показатели	Без зонта				Кл. закрыт				10%			
	А	В	С	Д	А	В	С	Д	А	В	С	Д
Сумма квадратов отклонений, $\Sigma(Y_i - Y_{cp})^2$	7597800	4860000	4730400	9541800	10697400	12074400	8359200	12166200	13332600	16221600	5124600	7794900
Дисперсия S, мЗ/ч	3798900	2430000	2365200	4770900	5348700	6037200	4179600	6083100	6666300	8110800	2562300	3897450
Среднее квадратичное отклонение σ , мЗ/ч	1949,1	1558,8	1537,9	2184,2	2312,7	2457,1	2044,4	2466,4	2581,9	2847,9	1600,7	1974,2
Коэффициент вариации v , %	19,2	17,9	17,4	26,4	23,9	29,6	23,7	28,0	24,1	30,2	17,4	21,4

показатели	20%				Смена агента			
	А	В	С	Д	А	В	С	Д
Сумма квадратов отклонений, $\Sigma(Y_i - Y_{cp})^2$	10222200	12074400	8332200	8040600	6485400	8704800	5005800	9757800
Дисперсия S, мЗ/ч	5111100	6037200	4166100	4020300	3242700	4352400	2502900	4878900
Среднее квадратичное отклонение σ , мЗ/ч	2260,8	2457,1	2041,1	2005,1	1800,7	2086,2	1582,1	2208,8
Коэффициент вариации v , %	21,3	25,2	22,3	21,7	17,8	24,2	17,6	23,5

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
(справочное)

Таблица Е 1 – Техничко-энергетические показатели процесса сушки яровой пшеницы и ячменя

Часы сушки		Влажность материала до сушки, w_1^k , %	Влажность материала после сушки, w_2^k , %	Влажность материала после охлаждения, w_3^k , %	Масса сухого зерна m , кг	Расход активной энергии P , кВт/ч	Расход реактивной энергии Q , кВтАр	Масса топлива Bm , кг	Пропускная способность по влажному зерну $GI = GZ$, кг/ч	Общее кол-во испаренной влаги по всей сушилке, ω_{1-3} , кг/ч	Кол-во испаренной влаги во время сушки исходя из производительности в пл.т, ω_{1-2} , кг/ч	Доп. расход теплоты на нагрев наружного воздуха по гост, q , МДж/кг.исп.вл.	Доп. расход теплоты на нагрев материала по гост, q , МДж/кг.исп.вл.	Производительность сушилки в плановых тоннах, A , пл.т/ч	Расход полной электроэнергии, S , кВт	Удельные энергозатраты на привод вентилятора, $N_{эл}$, МДж/кг.исп.вл.	Расход топлива, в кг. на пл.т.	Расход теплоты q , МДж/кг.исп.вл на пл. тонну	суммарный уд расход теплоты
Режим работы клапана-смесителя «смена агента» при нагреве воздуха $t_{нагр.возд}=100^\circ\text{C}$																			
1 час	22	14,5	13	7500	12	13,2	25,2	2788,46	288,46	260,94	-0,90	-0,55	3,74	14,27	0,59	6,74	4,13	6,17	
2 час	-	-	-	-	10,8	14,4	25,2	2788,46	288,46	260,94	-0,90	-0,55	3,74	14,40	0,60	6,74	4,13	6,17	
3 час	-	-	-	-	11,2	15,4	25,2	2788,46	288,46	260,94	-0,90	-0,55	3,74	15,23	0,63	6,74	4,13	6,21	

Продолжение таблицы Е1 – Техничко-энергетические показатели процесса сушки яровой пшеницы и ячменя

Режим работы клапана-смесителя «открытие 10% площади патрубка рециркуляции» при нагреве воздуха $t_{\text{нагр.возд}}=100^{\circ}\text{C}$																		
1 час	20,5	13,5	12	8000	10,4	14,2	23,1	2951,78	285,12	238,87	-0,92	-0,59	4,19	14,08	0,60	5,51	3,37	5,48
2 час	–	–	–	–	10	14,6	20,16	2951,78	285,12	238,87	-0,92	-0,59	4,19	14,16	0,60	4,81	2,94	5,05
3 час	–	–	–	–	9,8	14,2	20,16	2951,78	285,12	238,87	-0,92	-0,59	4,19	13,80	0,59	4,81	2,94	5,04
Режим работы клапана-смесителя «открытие 20% площади патрубка рециркуляции» при нагреве воздуха $t_{\text{нагр.возд}}=100^{\circ}\text{C}$																		
1 час	22	14,5	13	8000	9,2	13,8	24,78	2974,36	307,69	260,91	-0,84	-0,55	3,99	13,27	0,52	6,11	3,74	5,65
2 час	–	–	–	–	10,2	15	21,87	2974,36	307,69	260,91	-0,84	-0,55	3,99	14,51	0,56	5,27	3,22	5,18
3 час	–	–	–	–	10	15,1	21,87	2974,36	307,69	260,91	-0,84	-0,55	3,99	14,49	0,56	5,27	3,22	5,18
Режим работы клапана-смесителя «Автоматическое регулирование заслонки» при нагреве воздуха $t_{\text{нагр.возд}}=70^{\circ}\text{C}$																		
1 час	18,5	15	14	8000	9,8	14	17,22	2813,91	147,24	115,87	0,15	-0,47	2,42	13,67	1,20	7,12	4,35	5,88
2 час	–	–	–	–	10,1	14,8	15,12	2813,91	147,24	115,87	0,15	-0,47	2,42	14,33	1,25	6,25	3,82	5,40
3 час	–	–	–	–	9,9	14,6	13,67	2813,91	147,24	115,87	0,15	-0,47	2,42	14,15	1,24	5,73	3,51	5,07

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж
(справочное)

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Департамент научно-технологической политики и образования
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КОСТРОМСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

П Р И К А З

28 апреля 2021 г.

№ _____

Кострома

Научно-исследовательская часть

по хозяйственной тематике

На основании итогов конкурса внутривузовских грантов НИР на 2021 год

ПРИКАЗЫВАЮ:

1. Для выполнения работ по теме: «Разработка мобильного высокоэффективного устройства для сушки семян трав, зерновых и масличных культур на основе тканых материалов» создать с 28.04.2021 г. временный трудовой коллектив в составе:

- 1.1. Волхонов Михаил Станиславович – руководитель ВТК;
- 1.2. Смирнов Иван Альбертович – исполнитель, соруководитель ВТК;
- 1.3. Джаббаров Игорь Александрович – исполнитель;
- 1.4. Коваленко Родион Михайлович – исполнитель;
- 1.5. Чуперка Михаил Геннадьевич – исполнитель;
- 1.6. Сорока Илья Юрьевич - исполнитель

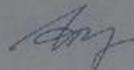
с оплатой работ по договору.

Основание: протокол собрания ВТК и личные заявления-обязательства членов ВТК

Врио проректора по НИР

Г.Б. Демьянова-Рой

Проект подготовила



И.И. Пилиева

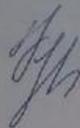
СОГЛАСОВАНО:

Начальник НИЧ



С.В. Курилов

Бухгалтер НИЧ



К.А. Кудрявцева

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2777996

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СУШКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромская государственная сельскохозяйственная академия" (RU)*

Авторы: *Волхонов Михаил Станиславович (RU), Смирнов Иван Альбертович (RU), Коваленко Родион Михайлович (RU)*

Заявка № 2021117268

Приоритет изобретения 11 июня 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 12 августа 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 11 июня 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 777 996**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
F26B 17/10 (2006.01)
F26B 21/04 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**(52) СПК
F26B 17/10 (2022.02); F26B 21/04 (2022.02)

(21)(22) Заявка: 2021117268, 11.06.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.06.2021Дата регистрации:
12.08.2022Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 11.06.2021

(45) Опубликовано: 12.08.2022 Бюл. № 23

Адрес для переписки:
156530, Костромская обл., Костромской р-н, п.
Каравасово, Учебный городок, 34, федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
"Костромская государственная
сельскохозяйственная академия"

(72) Автор(ы):

Волховов Михаил Станиславович (RU),
Смирнов Иван Альбертович (RU),
Коваленко Родион Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Костромская государственная
сельскохозяйственная академия" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2671464 C1, 31.10.2018. RU 40221
U1, 10.09.2004. RU 2259527 C2, 27.08.2005. WO
2011087419 A1, 21.07.2011.(54) **АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СУШКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**(57) **Формула изобретения**

Аэродинамическое устройство для сушки сыпучих материалов, содержащее аэрожелоб, разделенный грузонесущей перфорированной перегородкой на воздухоподводящую и транспортирующую части, представляющий собой каркас, обтянутый тканью, внешние стенки аэрожелоба и центральный воздухораспределительный канал изготовлены из воздухо непроницаемой и водоотталкивающей ткани, а внутренние боковые стенки из ткани для сит, отличающееся тем, что установлена система рециркуляции отработавшего агента сушки, состоящая из сдвижного зонта с загрузочным отверстием, пылеулавливающего устройства, клапана смесителя, а также вентилятора аспиратора, обеспечивающего режим аспирации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
(справочное)



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Костромская государственная сельскохозяйственная академия»

**72-я Международная научно-практическая конференция
ФГБОУ ВО Костромской ГСХА
«Научные приоритеты агропромышленного
комплекса в России и за рубежом»**

**СЕРТИФИКАТ
УЧАСТНИКА**

награждается

Коваленко Родион Михайлович

аспирант 2-го года обучения, направления подготовки 35.06.04
Технологии, средства механизации и энергетическое

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Костромская государственная
сельскохозяйственная академия"

за работу на тему:

"Разработка и обоснование режимов работы передвижной
аэрожелобной сушилки"

на секции:

"Состояние и перспективы инженерно-технического и
технологического обеспечения АПК в области энергетики и
механизации"

Врио проректора по НИР
ФГБОУ ВО Костромской ГСХА



Г.Б. Демьянова-Рой

Кострома, 22 апреля 2021 года

Стенограмма
работы секции «Состояние и перспективы инженерно-технологического и
технического обеспечения АПК в области энергетики и механизации»

1. Результаты исследования U образных конструкций трансформаторов тока Роговского.
Думиника Кристина Петровна

Петрюк И.П. Поясните зависимости, приведенные на слайде 7.

Зинцов А.Н. Эксперимент является трехфакторным?

Солдатов В.А. Почему в наши дни топографические приборы ОМП стали получать большее распространение?

2. Определение эффективности двигателя, работающего по циклу Аткинсона
Куклин Владимир Николаевич

Зинцов А.Н. Как давно был изобретен этот цикл и почему до сих пор не строят двигатели на его основе?

Какой будет надежность двигателя?

3. Исследование эффективности работы установки обезжелезивания воды новой конструкции на основе озono-воздушной смеси
Смирнов Владислав Александрович

Клочков Н.А. Какие характеристики караваевской воды? Может ли ваша установка повысить ее качество?

Зинцов А.Н. Проводили ли экономический расчет?

Солдатов В.А. При экспериментах меняли ли давление воды?

4. Определение места повреждения в сетях 10 кВ при использовании фазных координат и координат трех симметричных составляющих в конце линии
Солдатов Валерий Александрович

Трофимов М.А. Исследования проводились на стендах или с помощью моделирования на ЭВМ?

5. Технологические основы производства модифицированного льноволокна и сравнение оценки свойств, получаемого из него нетканого материала для биокомпозитов
Разин Сергей Николаевич

Клочков Н.А. Поясните термин «модифицированное волокно»

Качество льна из разных областей влияет на результаты исследования?

Петрюк И.П. Какие области применения биокомпозитов, полученных из ваших материалов?

6. К совершенствованию поточно-технологической линии стрижки и зооветеринарной обработки овец
Фириченков Вилорий Ефимович

Зинцов А.Н. Как проводимые манипуляции на поточной линии влияют на психическое здоровье овец?

Клочков Н.А. В какой период года проводится стрижка?

7. Моделирование процесса разрыва лубяных волокон на машине РМП-1
Пашин Евгений Львович

Клочков Н.А. Какое практическое значение исследования?

Зинцов А.Н. Поясните почему такая форма у графика разрыва волокон?

Васильков А.А. На сколько изменится точность установки после модернизации?

8. Обоснование и разработка нового процесса комлеподбивания стеблей льна-долгунца в лентах при их оборачивании

Зинцов Александр Николаевич

Клочков Н.А. Как обеспечивается осевой удар, если транспортер находится под углом?

Лобачев А.А. Насколько увеличится качество подбоя после модернизации машины?

Васильков А.А. Как изменялись исследуемые параметры машины в полевых условиях?

9. Совершенствование предпосевной обработки семян

Беляков Максим Михайлович

Зинцов А.Н. Почему вы выбрали ультразвуковую обработку семян?

С чем вы сравнивали эффективность обработки ваших семян?

Фириченко В.Е. Как влияет длительность обработки на всхожесть?

10. Разработка пневмотранспортера-ворошителя солода

Сорока Илья Юрьевич

Фириченко В.Е. Вы упоминали об уменьшении травмирования солода, это доказано?

Лобачев А.А. Как осуществляется забор зерна?

11. Совершенствование конструкции передвижной аэрожелобной сушилки

Коваленко Радион Михайлович

Пашин Е.Л. В чем заключается новизна схемы установки?

Зинцов А.Н. Как вы будете управлять влажностью воздуха при исследовании?

Секретарь



Руководитель секции





Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Костромская государственная сельскохозяйственная академия»

74-ая Всероссийская (национальная)
научно-практическая конференция
СОВРЕМЕННАЯ НАУКА: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
И ДОСТИЖЕНИЯ В ЭПОХУ
ТРАНСФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

СЕРТИФИКАТ

НАГРАЖДАЕТСЯ

**Волхонов Михаил Станиславович,
Коваленко Родион Михайлович**

за успешное участие в конференции
и презентацию доклада по секции
«Технологии, машины и оборудование»
на тему

«Разработка и обоснование режимов работы
передвижной зерновой сушиллки»

Председатель организационного комитета
ректор ФГБОУ ВО Костромской ГОУ
доктор технических наук, профессор



M.S. Volkhonov М.С. Волхонов

ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА

СЕРТИФИКАТ

Участника

Всероссийской научно-практической
конференции

“Современное состояние: проблемы
и перспективы развития
агропромышленного комплекса”

Выдан

Коваленко Родиону Михайловичу

Тема доклада: “Разработка и обоснование режимов работы
передвижной аэрожелобной сушилки”

29.04.2022

(дата)



Врио ректора

Е.Е. Малиновская

№ 00001

ПРИЛОЖЕНИЕ И

(справочное)

Акты внедрения

СОГЛАСОВАНО

Проректор по НИР
ФГБОУ ВО Костромской ГСХА
кандидат технических наук,
доцент

« 15 » 11 2024 г. С.В. Иванов



УТВЕРЖДАЮ

Директор ЗАО «Шунга»
А.С. Лазутин
« 15 » 11 2024 г.



АКТ

внедрения научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представители ЗАО «Шунга»: директор Лазутин Александр Степанович и представители ФГБОУ ВО Костромской ГСХА: д.т.н., профессор, профессор кафедры ТС в АПК Волхонов Михаил Станиславович и аспирант кафедры ТС в АПК Коваленко Родион Михайлович, составили настоящий акт внедрения научно-исследовательской работы, а именно: «Обоснование параметров и режимов работы системы рециркуляции воздуха аэродинамического устройства для сушки зерна».

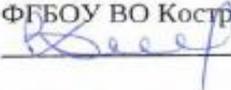
В лабораторных условиях кафедры «Технические системы в агропромышленном комплексе» ФГБОУ ВО Костромская ГСХА, были проведены исследования по изучению процесса сушки зерна. На основе проведенных исследований был разработан и изготовлен опытный образец аэродинамического устройства для сушки зерна состоящий из камеры сушки содержащей аэрожелоб, разделенный грузонесущей перфорированной перегородкой на воздухоподводящую и транспортирующую части. Камера сушки представляет собой металлический каркас, обтянутый тканью, внешние стенки изготовлены из воздухо непроницаемой и водоотталкивающей ткани, а внутренние боковые стенки из ткани для сит. Аэродинамическое устройство для сушки зерна оснащено системой рециркуляции агента сушки, включающей: сдвижной зонт с загрузочным отверстием; пылеулавливающее устройство; клапан-смеситель, поворотной заслонкой которого производится смена режимов работы системы рециркуляции; вентилятор аспиратор.

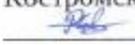
На зернотоке ЗАО «Шунга», расположенного в поселке Шунга Костромского района Костромской области в 2024 году с 16 августа по 05 сентября на опытном образце аэродинамического устройства для сушки зерна было высушено 24 тонны ярового ячменя на фураж. Влажность материала была снижена с 22% до 12%.

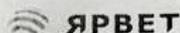
Во время производственных испытаний были исследованы 3 режима работы системы рециркуляции агента сушки аэродинамического устройства для зерна. Интегральный расход энергии на 1 кг испаренной влаги из зерна в режиме - «смена агента сушки» составил 6,21 МДж/кг. исп.вл. При открытии 10% площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя в режиме работы системы рециркуляции агента сушки - «частичное подмешивание свежего воздуха» интегральный расход энергии составил 5,04

МДж/кг.исп.вл. При открытии 20 % площади патрубка рециркуляции клапана-смесителя в режиме работы системы рециркуляции агента сушки - «частичное подмешивание свежего воздуха» интегральный расход энергии составил 5,18 МДж/кг.исп.вл.

Качественные показатели ярового ячменя после сушки на основании экспертизы, проведенной лабораторией «ЯРВЕТ» от 01.10.2024 № 24111831 следующие: сухое вещество 89,79 %; крахмал 53,05% СВ; жир 2,32% СВ; сырой протеин 12,13 % СВ; сырая клетчатка 7,14 % СВ; аНДК 19,12 % СВ; аНДК по органическому веществу 17,98%; КДК 9,12%; перевариваемость аНДК по органическому веществу за 12 ч, 15,36%; перевариваемость аНДК по органическому веществу за 72 ч, 57,44%; перевариваемость аНДК по органическому веществу за 120 ч, 58,63%; зола 4,31 % СВ; переваримые питательные вещества 77,81 % СВ; обменная энергия 11,13 МДж/кг СВ; чистая энергия лактации 7,04 МДж/кг СВ; чистая энергия на привес 5,76 МДж/кг СВ; чистая энергия жизнедеятельности 8,51 МДж/кг СВ; VEM 1019,69; БЭВ концентраты 741,03 г/кг СВ; перевариваемый протеин (по ВНИИ кормов) 96,36 г/кг.

Д.т.н., профессор кафедры
«Технические системы в
агропромышленном комплексе»
ФГБОУ ВО Костромской ГСХА
 М.С. Волхонов

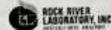
Аспирант кафедры «Технические
системы в агропромышленном
комплексе» ФГБОУ ВО
Костромской ГСХА
 Р.М. Коваленко



ЛАБОРАТОРИЯ
LAB.YARVET.RU

БЕСПЛАТНАЯ ДОСТАВКА ПРОБ
8 800 222 97 30

Analysis support
provided by:



Клиент
Образец
Номер образца
Дата отбора
Дата анализа

ООО "ПрофКорм"
Ячмень
24111831
30.09.2024
01.10.2024



Комментарий

ЗАО Шунга

Показатель	Единицы измерения	Результат	Цель	Сред. знач. по лаб.
Влажность	%	10,21		11,25
Сухое вещество	%	89,79		88,75
Крахмал	%СВ	53,05		53,55
Жир	%СВ	2,32		2,24
Сырой протеин	%СВ	12,13		12,55
Сырая клетчатка	%СВ	7,14		6,24
аНДК	%СВ	19,12		17,55
аНДК по орг. веществу	%СВ	17,98		16,29
КДК	%СВ	9,12		7,84
Переваримость аНДК по орг. веществу за 12 ч	%аНДК по ОВ	15,36		13,91
Переваримость аНДК по орг. веществу за 72 ч	%аНДК по ОВ	57,44		58,73
Переваримость аНДК по орг. веществу за 120 ч	%аНДК по ОВ	58,63		61,45
Зола	%СВ	4,31		3,90
Переваримые питательные вещества	%СВ	77,81		79,42
Обменная энергия	МДж/кг СВ	11,13	> 11,68	11,36
Чистая энергия лактации	МДж/кг СВ	7,04	> 7,42	7,19
Чистая энергия на привес	МДж/кг СВ	5,76		5,97
Чистая энергия жизнедеятельности	МДж/кг СВ	8,51		8,76
НЕМ		1 019,69		1 042,43
БЭВ концентраты	г/кг СВ	741,03		749,30
Переваримый протеин (по ВНИИ кормов)	г/кг	96,36		98,71

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НИР

ФГБОУ ВО Костромской ГСХА

кандидат технических наук,

доцент

С.В. Иванов

« 25 » 10 2023 г.

АКТ

внедрении научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представители «Опытного поля» Сорокин Алексей Николаевич и представители кафедры «Технические системы в агропромышленном комплексе» ФГБОУ ВО Костромской ГСХА: д.т.н., профессор, профессор кафедры Волхонов Михаил Станиславович; аспирант Коваленко Родион Михайлович, составили настоящий акт внедрения научно-исследовательской работы, а именно: «Обоснование параметров и режимов работы системы рециркуляции воздуха аэродинамического устройства для сушки зерна».

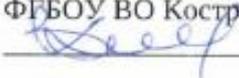
В лабораторных условиях кафедры «Технические системы в агропромышленном комплексе» ФГБОУ ВО Костромская ГСХА, были проведены исследования по изучению процесса сушки зерна. На основе проведенных исследований был разработан и изготовлен опытный образец аэродинамического устройства для зерна, состоящий из камеры сушки, содержащей аэрожелоб, разделенный грузонесущей перфорированной перегородкой на воздухоподводящую и транспортирующую части. Камера сушки представляет собой металлический каркас, обтянутый тканью, внешние стенки изготовлены из воздухонепроницаемой и водоотталкивающей ткани, а внутренние боковые стенки из ткани для сит. Аэродинамическое устройство для сушки зерна оснащено системой рециркуляции агента сушки, включающей: сдвижной зонт с загрузочным отверстием; пылеулавливающее устройство; клапан-смеситель, поворотной заслонкой которого производится смена режимов работы системы рециркуляции в автоматическом режиме; вентилятор аспиратор.

На опытном поле ФГБОУ ВО Костромской ГСХА, расположенного в поселке Караваево Костромского района Костромской области в 2023 году с 01 сентября по 30 сентября, на опытном образце аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов было высушено 16 тонн пшеницы. Влажность материала была снижена с 18% до 14%.

Во время производственных испытаний был исследован автоматический режим работы системы рециркуляции воздуха аэродинамического устройства для сушки зерна при сушке пшеницы на фураж. В результате испытаний при поддержании температуры агента сушки 70°C и постоянной влажности отработавшего агента сушки 70%, зафиксированы

следующие результаты: производительность 2,24 пл.т/ч, интегральный расход энергии на испарение 1 кг влаги из зерна составил 5,07 МДж/кг.исп.вл.

Качественные показатели пшеницы после сушки на основании исследования лаборатории кафедры земледелия, растениеводства и селекции, следующие: зерновая примесь 1,9%; вредная примесь 0%; зараженность и загрязненность вредителями 0%; содержание клейковины 21%; белка 12,87%; натура 722 г/л; сорная примесь 0,1%; стекловидность 48%; число падения 274 с; класс зерна 4.

Д.т.н., профессор кафедры
«Технические системы в
агропромышленном комплексе»
ФГБОУ ВО Костромской ГСХА
 М.С. Волхонов

Заведующий «Опытного поля»
ФГБОУ ВО Костромской
ГСХА

 А.Н. Сорокин

Аспирант кафедры «Технические
системы в агропромышленном
комплексе» ФГБОУ ВО
Костромской ГСХА
 Р.М. Коваленко

ПРИЛОЖЕНИЕ К
(справочное)

Результаты расчета технико-экономической эффективности разработанного аэродинамического устройства для сушки зерна, оснащенного системой рециркуляции агента сушки в сравнении с приемным устройством с аэрожелобом УПА-15. Методика расчета приведена в разделе 5.

Стоимость раскройных работ:

$$C_{р.р}=56 \cdot 150 \cdot 1,6 \cdot 1,302=17498,90 \text{ руб.}$$

Стоимость швейных работ:

$$C_{шв.р}=176 \cdot 150 \cdot 1,6 \cdot 1,302=54996,50 \text{ руб.}$$

Стоимость слесарных работ:

$$C_{сл.р}=56 \cdot 150 \cdot 1,6 \cdot 1,302=17498,90 \text{ руб.}$$

Стоимость сварочных работ:

$$C_{св.р}=24 \cdot 250 \cdot 1,6 \cdot 1,302=12499,20 \text{ руб.}$$

Общая стоимость работ:

$$C_p=102493,50 \text{ руб.}$$

Стоимость изготовления деталей:

$$C_{ид}=74808+102493,50=177301,5 \text{ руб.}$$

Стоимость монтажных работ:

$$C_{мп} = 8 \cdot 150 \cdot 1,6 \cdot 1,302=2499,90 \text{ руб.}$$

Стоимость изготовления устройства:

$$C_{изу} = 2046 + 177301,5 + 2499,90 = 181847,4 \text{ руб.}$$

$$C_{ДО} = 548000 + 675000 + 148000 + 58000 + 72500 + 25000 + 14700 + 14340 = 1555540 \text{ руб.}$$

$$K_H^{ПП} = 181847,4 + 1555540 = 1737387,7 \text{ руб.}$$

Время работы сушилки.

Проектный вариант:

$$t_{П} = \frac{12,5}{4,09} = 3,06 \text{ часов.}$$

Базовый вариант:

$$t_{Б} = \frac{12,5}{1,25} = 10 \text{ часов.}$$

Затраты на оплату труда обслуживающего персонала.

Проектный вариант:

$$З_{ПП} = 3,06 \cdot 150 \cdot 1,6 \cdot 1,302 = 956,18 \text{ руб.}$$

Базовый вариант:

$$З_{ПБ} = 10 \cdot 150 \cdot 1,6 \cdot 1,302 = 3124,8 \text{ руб.}$$

Отчисления на амортизацию в расчете на одну загрузку.

Проектный вариант:

$$A_{II} = \frac{173387,7 \cdot 14,3}{40 \cdot 100} = 6211,16 \text{ руб.}$$

Базовый вариант:

$$A_B = \frac{2098000 \cdot 14,3}{40 \cdot 100} = 7500,35 \text{ руб.}$$

$$K_H^{EA3} = 2098000 \text{ руб.}$$

Отчисления на ремонт и техническое обслуживание.

Проектный вариант:

$$P_{II} = \frac{1737387,7 \cdot 7}{40 \cdot 100} = 3040,43 \text{ руб.}$$

Базовый вариант:

$$P_B = \frac{2098000 \cdot 7}{40 \cdot 100} = 3671,5 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию при сушке.

Проектный вариант:

$$Z_{ЭП} = 3,06 \cdot 14,5 \cdot 10 = 443 \text{ руб.}$$

Базовый вариант:

$$Z_{ЭБ} = 10 \cdot 36 \cdot 10 = 3600 \text{ руб.}$$

Затраты электроэнергии на загрузку и разгрузку зерна.

$$Z_{ЭВГ} = 2 \cdot 7,5 \cdot 10 = 150 \text{ руб.}$$

Количество влаги, испаряемой при сушке из зерна.

$$M_B = 12,5 \cdot \frac{20-14}{100-14} = 0,87 \text{ пл. т.}$$

Проектный вариант:

$$Z_{П} = \frac{70 \cdot 5040 \cdot 0,87}{42,7} = 7188,2 \text{ руб.}$$

Базовый вариант:

$$Z_{Б} = \frac{70 \cdot 9500 \cdot 0,87}{42,7} = 13549,18 \text{ руб.}$$

Прочие затраты.

Проектный вариант:

$$Z_{ПРП} = 0,08 \cdot (956,18 + 6211,16 + 3040,43 + 150 + 443 + 7188,2) = 1439,12 \text{ руб.}$$

Базовый вариант:

$$Z_{ПРБ} = 0,08 \cdot (3124,9 + 7500,35 + 3671,5 + 150 + 3600 + 13549,18) = 2527,67 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные издержки.

Проектный вариант:

$$I_{Эн}^{пр} = 956,18 + 6211,16 + 3040,43 + 150 + 443 + 7188,2 + 1439,12 = 19428,09 \text{ руб.}$$

Базовый вариант:

$$И_{Эи}^{баз} = 3124,9 + 7500,35 + 3671,5 + 150 + 3600 + 13549,18 + 2527,67 = 34123,6 \text{ руб.}$$

Удельная экономия на 1 партию зерна.

$$Э_{уд} = 34123,6 - 19428,09 = 14695,51 \text{ руб.}$$

Годовая экономия.

$$Г_э = 14695,51 \cdot 40 = 587820,4 \text{ руб.}$$

Приведенные затраты.

Проектный вариант

$$З_{iPP} = (1737387,7 \cdot 0,2) + 19428,09 = 366905,63 \text{ руб.}$$

Базовый вариант:

$$З_{iB} = (2098000 \cdot 0,2) + 34123,6 = 453723,6 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект.

$$Г_{ээ} = 453723,6 - 366905,63 = 86817,97 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости проектного варианта.

$$T = \frac{1737387,7}{587820,4} = 2,96 \text{ года}$$