

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

*На правах рукописи*

**КОВАЛЕНКО РОДИОН МИХАЙЛОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ  
РЕЦИРКУЛЯЦИИ АГЕНТА СУШКИ ПЕРЕДВИЖНОГО  
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СУШКИ СЫПУЧИХ  
МАТЕРИАЛОВ**

Направление подготовки 35.06.04 Технологии, средства механизации  
и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для  
агропромышленного комплекса

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор  
Волхонов Михаил  
Станиславович

Караваево-2024

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** 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.

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. Как правило, в открытых источниках приводится неполная и несистематизированная информация о характеристиках выпускаемых в мире передвижных сушилок зернового вороха и отсутствует классификация, что

значительно осложняет их анализ и выбор при покупке для сельскохозяйственных предприятий.

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. Тем не менее передвижным зерновым сушилкам сегодня уделяется особое внимание, так как данный тип сушилок обладает рядом преимуществ:

- мобильностью, не требуется строительство технических сооружений и фундаментов;
- условиями работы, они могут создаваться непосредственно в поле;
- автономностью, возможностью работы на дизельном, газовом или твердом топливе, без электричества (при работе от вала отбора мощности трактора).

**Целью исследования** является разработка системы рециркуляции агента сушки передвижного аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов.

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

- проанализировать существующий парк передвижных зерновых сушилок, выпускаемых в мире, составить их классификацию;
- определить технико-экономические показатели удельной металлоемкости, удельной стоимости, удельного расхода теплоты на сушку проанализированных передвижных зерновых сушилок, а также предложить методику оценки эффективности зерносушилок, учитывающую основные показатели, выявить наиболее эффективные;
- разработать технологическую схему системы рециркуляции агента сушки передвижного аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов;

- провести теоретический расчет теплотехнической эффективности рециркуляции агента сушки, описать оптимальные режимы работы;
- разработать методику проведения научных исследований эффективности разработанной системы рециркуляции агента сушки;
- провести лабораторные и производственные испытания теоретически рассчитанных режимов работы системы рециркуляции агента сушки;
- дать технико-экономическую оценку работы системы рециркуляции агента сушки передвижного аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов.

**Объект исследования** – система рециркуляции агента сушки.

**Предмет исследования** - теплотехническая эффективность системы рециркуляции агента сушки.

**Гипотеза исследования**- в случае использования системы рециркуляции агента сушки можно добиться снижения энергозатрат на сушку, а также уменьшить запыленность рабочей зоны.

**Научная новизна** заключается в:

- разработанной конструкции передвижного аэродинамическом устройстве для сушки сыпучих материалов (патент № 2777996);
- обосновании режимов работы системы рециркуляции агента сушки
- проведенной оценке экономической эффективности применения системы рециркуляции агента сушки

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

**Практическая ценность и реализация результатов исследования.**

Благодаря внутривузовскому гранту на тему: «Разработка мобильного высокоэффективного устройства для сушки семян трав и масличных культур на

основе тканых материалов», полученному в ФГБОУ ВО Костромской ГСХА, разработано передвижное аэродинамическое устройство для сушки сыпучих материалов, которое состоит из камеры сушки собранной по каркасно-тканевой технологии с установленной системой рециркуляции агента сушки состоящей из сдвижного зонта с грузочным отверстием, пылеулавливающего устройства, клапана смесителя, а также вентилятора аспиратора, обеспечивающего режим аспирации.

**Апробация работы** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научных и научно-практических конференциях:

Принял участие в региональном этапе Всероссийской программы поддержки талантливой молодежи «Умник 2021» заявка была отобрана для выступления в финале. На региональном этапе Всероссийской программы поддержки талантливой молодежи «Умник 2023». Являлся участником: 72-ой Международной научно-практической конференции «Научные приоритеты агропромышленного комплекса в России и за рубежом», секция «Состояние и перспективы инженерно-технологического обеспечения АПК в области энергетики и механизации»; 73-ой Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе», секция «Состояние и перспективы инженерно-технологического и технического обеспечения АПК в области энергетики и механизации»; 74-ой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современная наука: актуальные вопросы и достижения в эпоху трансформационных процессов», секция «Технологии, машины и оборудование»; проходившие на базе ФГБОУ ВО Костромской ГСХА.

В 2022 принял участие во Всероссийской научно-практической конференции «Современное состояние проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса», проходящей на базе ФГБОУ ВО Ивановской ГСХА.

**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 на ЭВМ 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, занимавшихся исследованием процесса ультразвуковой обработки, аналитические материалы научно-исследовательских организаций России и стран мира

**На защиту выносятся:**

- Конструктивно-технологическая схема передвижного аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов, рациональные режимные параметры работы системы рециркуляции агента сушки;
- результаты теоретических расчетов теплотехнической эффективности рециркуляции сушильного агента при постоянном подмешивании свежего воздуха, при однократном подмешивании свежего воздуха и целесообразности применения рециркуляции по условию конденсации влаги.
- результаты экспериментальных исследований аэродинамических характеристик системы рециркуляции агента сушки передвижного аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов;
- результаты производственных испытаний системы рециркуляции агента сушки.

**Публикации.** Основные положения работы отражены в 4 публикациях, в том числе 2 публикации в научном журнале, входящем в текущий Перечень ВАК России, получен патент № 2777996 запись о регистрации патента внесена в Государственный реестр изобретений Российской Федерации от 12.08.2022

**Структура и объем работы** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка литературы, приложений. При объёме 179 страниц, содержит 127 страниц основного текста, 69 рисунков, 7 таблиц, 8 приложений. В приложениях приведены: документы, подтверждающие апробацию работы, и другие вспомогательные материалы. Список использованных источников включает 88 наименований.

Диссертационная работа оформлена в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11[88]

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю – доктору технических наук, профессору, Михаилу Станиславовичу Волхонову; сотрудникам и аспирантам кафедры технических систем в АПК; заведующему структурным подразделением «Опытное поле»; начальнику электроотдела ФГБОУ ВО Костромской ГСХА за оказанную помощь и содействие при выполнении данной работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введение** обоснована актуальность темы, сформулированы цель исследований, теоретическая и практическая значимость, а также определены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе **«Анализ зерносушильного парка и задачи исследования»** проведен анализ способов сушки зерна, изучены основные виды передвижных зерновых сушилок отечественного и зарубежного производства и составлена их классификация (см. рис.1). Изучены известные способы снижения энергоёмкости процесса сушки, анализ энергоэффективности показал, что повторное использование части отработавшего агента сушки является приоритетным направлением снижения энерготрат. Изучено устройства для повторного использования отработавшего агента сушки, а также работ, направленных на теоретический анализ эффективности повторного использования агента сушки.

При анализе современного состояния вопроса были использованы работы ученых и специалистов в данной области как: Волхонова М.С., Смирнова И.А., Птицина С.Д, Буркова А.И., Конышева Н.Л., Рощина О.П., Зимина И.Б., Щепилова Н.Я., Блохина П.В., Висневски Г., Голубковича А.В., Чижова А.Г., Гришина М.А., Захарченко И.В., Малина Н.И., Машковцева М.Ф., Мильмана И.Э., Шевцова В.В., Есакова Ю.В., Окуня Г.С., Чижикова А.Г., Третьяковой Т.В., Раецкиса П.Ю., Соседова Н.И., Шухновой Н.В., Спиридоновой М.Г., Куценко К.И., Атаназевича В.И., Пешкова В.И., Кириченко С.И., Яговкина П.В. и многих других.

Изученные методы сушки зерна позволили выявить, что в хозяйственной практике широко применяются: конвективная (воздушно-газовая и воздушная) сушка на установках для активной вентиляции зерна, в зерносушилках и в специальных металлических силосах, редко силосах элеваторов для любых регионов страны; солнечная сушка на зернотоках хозяйств в районах с соответствующим климатом.



Полученные результаты исследования по передвижным зерновым сушилкам указывают на возможные направления совершенствования конструкций: недостаточная реализация принципа повторного использования отработавшего агента сушки, который является наиболее перспективным с точки зрения совершенствования конструкции; обеспечения автоматизации процесса сушки на низком уровне; особое внимание следует уделить визуализации процесса сушки.

Коэффициент рециркуляции агента сушки зависит от параметров атмосферного воздуха, отработавшего агента сушки и температуры материала в начале сушки. Эффективность рециркуляции определяет показатель  $\eta_p$  – теплотехническая эффективность рециркуляции, но действие этого показателя ограничивает условие конденсации  $d_2 > d_1$ , при выполнении которого целесообразна частичная рециркуляция. Увеличение теплотехнической эффективности рециркуляции способствует увеличению температуры материала в начале сушки.

В соответствии с проведенным анализом были поставлены цель и задачи диссертационной работы.

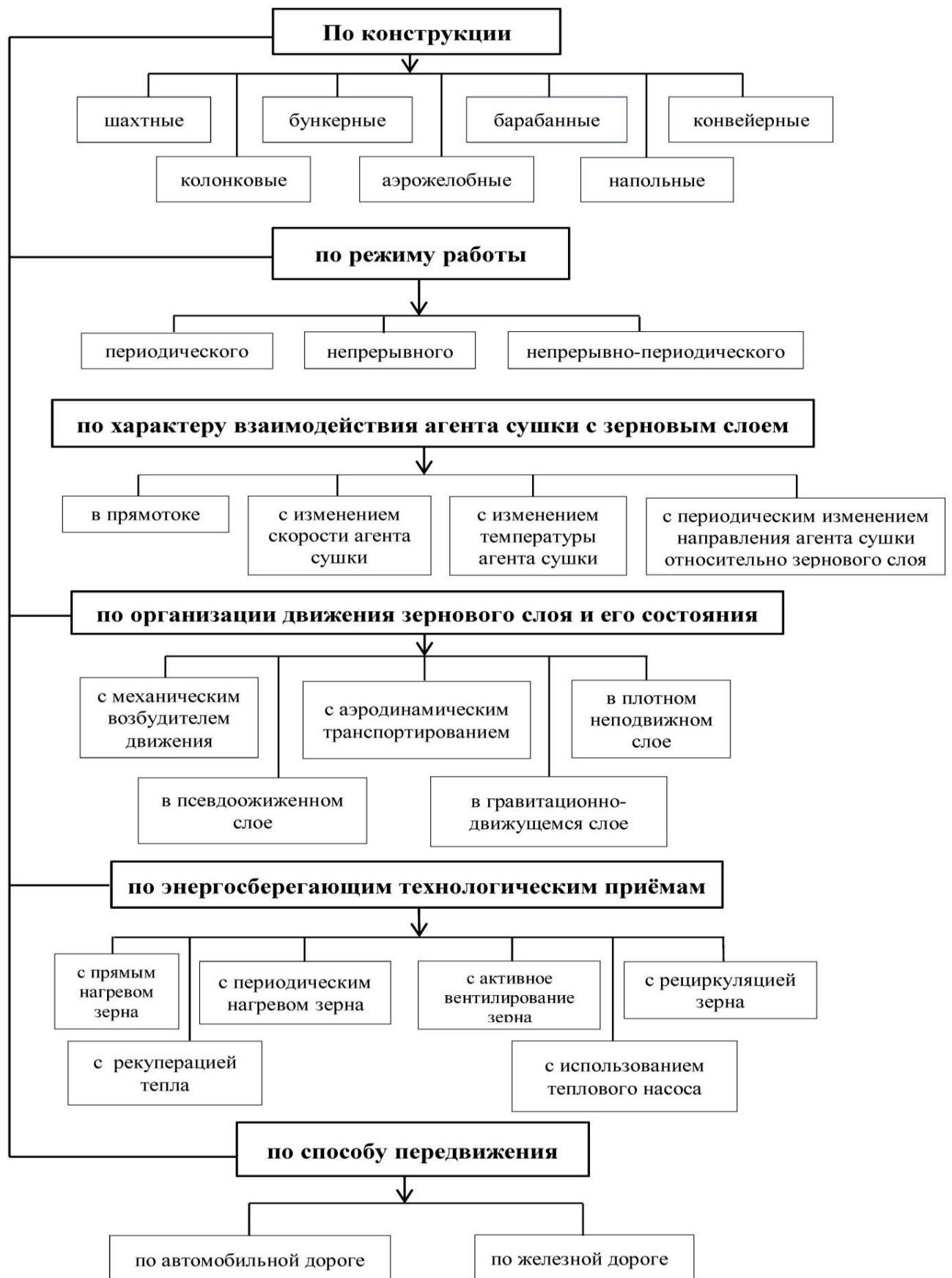


Рис. .1 - Классификация передвижных зерновых сушилок

Во второй главе «Обоснование технологической схемы повторного использования отработавшего агента сушки» предложена обобщенная характеристика - «комплексный показатель совершенства конструкции сушилки», учитывающий удельную металлоемкость и удельный расход теплоты, которые при сопоставлении с удельной стоимостью позволяют получить полную информацию о зерносушилке:

$$K_p = M_{уд} \cdot Q$$

где  $K_p$  – комплексный показатель совершенства конструкции сушилки, (МДж·т·ч) / (пл. т · кг. исп. вл.);

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

$Q$  – удельный расход теплоты, (МДж·ч)/кг.исп.вл.

Для наглядности и облегчения выбора передвижных сушилок предлагается использовать графическое представление данных показателей эффективности (см. рис.2).

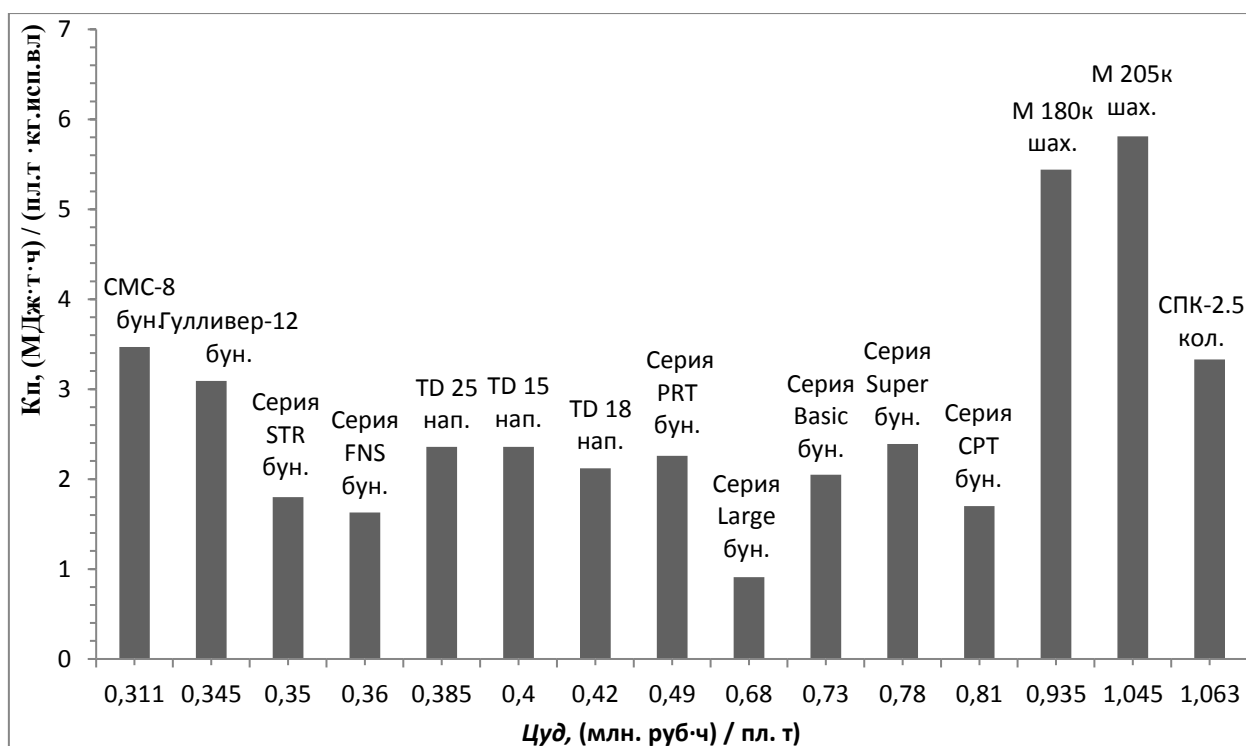


Рис. 2– Графическое представление показателей эффективности передвижных сушилок. бун.-бункерный тип сушилки; нап. - напольный тип сушилки; кол. - колонковый тип сушилки; шах. - шахтный тип сушилки

Изобретено аэродинамического устройство для сушки сыпучих материалов, относящееся к сельскохозяйственному машиностроению, а именно к устройствам для приема, временного хранения, вентилирования, подсушки и транспортирования сыпучих материалов [86]

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 воздухонепроницаемой и водоотталкивающей ткани, а внутренние боковые стенки из ткани для сит, с установленной системой рециркуляции отработавшего агента сушки состоящей из сдвижного зонта с загрузочным отверстием, пылеулавливающего устройства, клапана смесителя, а также вентилятора аспиратора, обеспечивающего режим аспирации.

Аэродинамическое устройство для сушки сыпучих материалов работает следующим образом (рис. 3 и 4):

-в случае отсутствия загрузочной норрии сдвижной зонт 6 сдвигается в сторону пылеулавливающего устройства 5, зерно загружается сверху в аэродинамическое устройство для сушки сыпучих материалов на грузонесущую перфорированную перегородку 18, затем зонт сдвигается в исходное положение, фиксируется герметично;

-в случае наличия загрузочной норрии зерно загружается через загрузочное отверстие 11, затем закрывается герметично. Включается вентилятор 1, при этом агент сушки, проходящий через зерно, подогревая и отбирая поверхностную влагу, выходит из него в надсушильное пространство, созданное сдвижным зонтом 6, откуда проходя через пылеулавливающее устройство 5 высасывается вентилятором аспиратором 8 и направляется в клапан смеситель 3, который в свою очередь частично или полностью распределяет отработавший агент сушки. В зависимости от

положения поворотной заслонки 15, «режим рециркуляции» (рис. 5), отработавший агент сушки может быть полностью или частично направлен на повторное использование, либо полностью выброшен в атмосферу через патрубок 12 «режим смены теплоносителя» (рис. 8). В режиме «смешивание» (рис. 9), смесь частично отработавшего агента сушки и наружного воздуха вентилятором 1 (рис. 5) подается в теплогенератор 4 и далее в аэродинамическое устройство для сушки сыпучих материалов 7. Неподвижная заслонка 13, перекрывающая камеру смешивания 14 между патрубками подвода наружного воздуха и отработавшего агента сушки, обеспечивает 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 вентилирования или подсушки зерна, для осуществления его выгрузки из аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов, открывается шиберная заслонка 16 (рис. 4) выпускного лотка 17, подача воздуха осуществляется только под грузонесущую перегородку 18 и происходит выгрузка высушенного зерна.

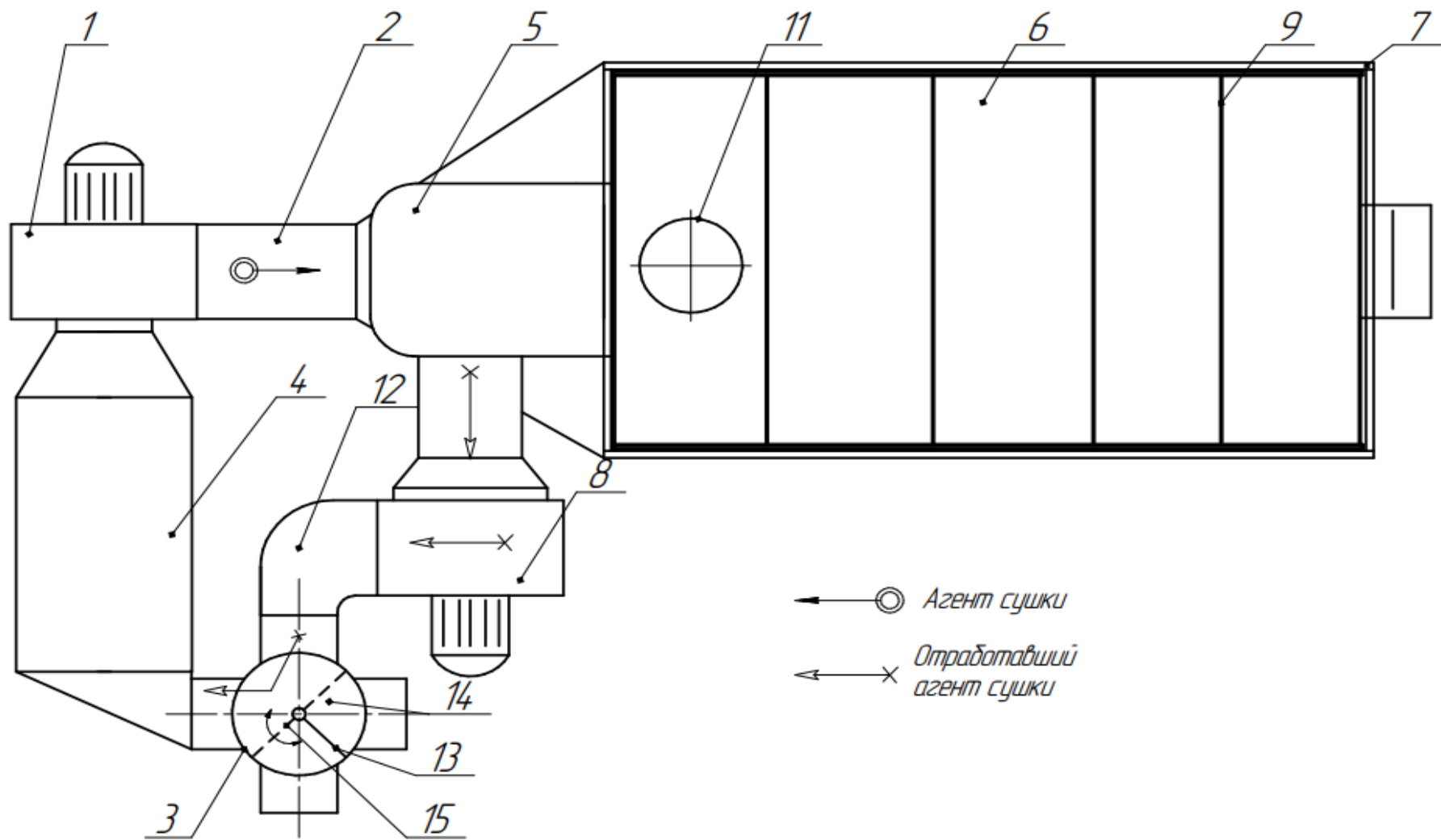


Рис. 3 - Общий вид аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов.

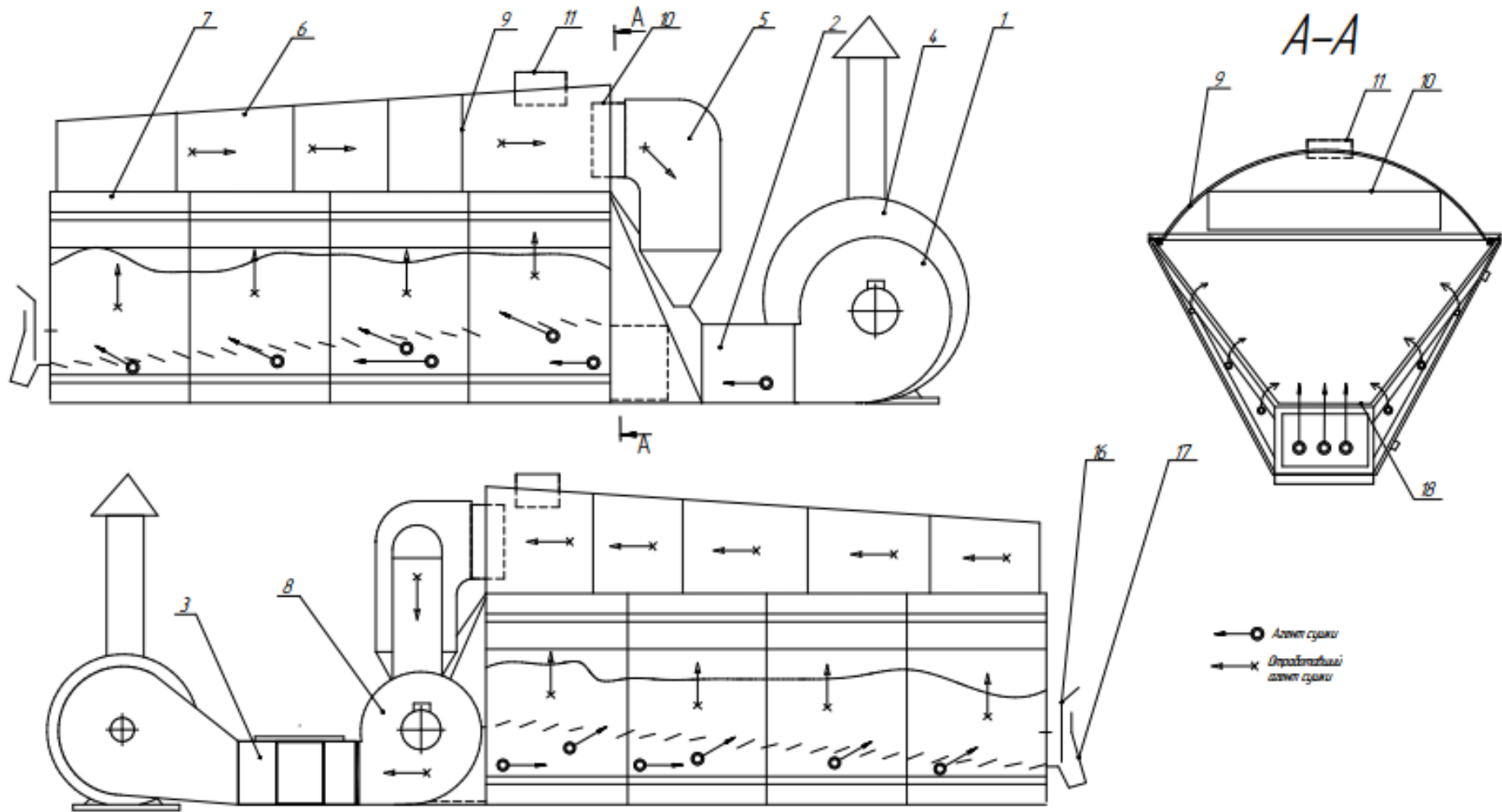


Рис. 4 - Дополнительные виды аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов.

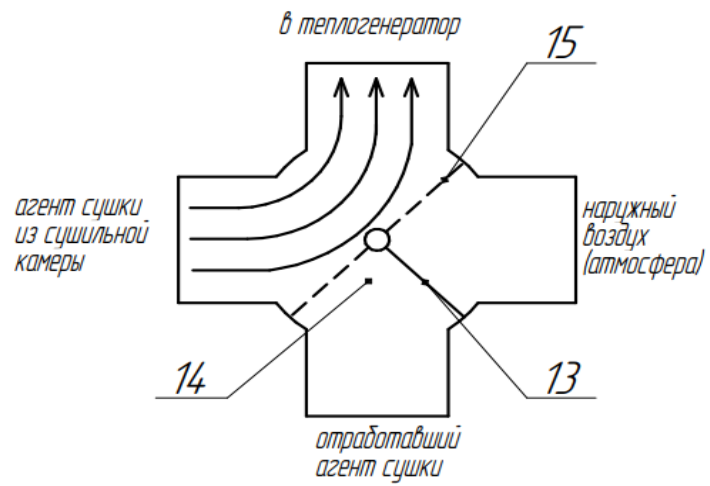


Рис. 7 - Клапан-смеситель в режиме рециркуляции отработавшего агента сушки

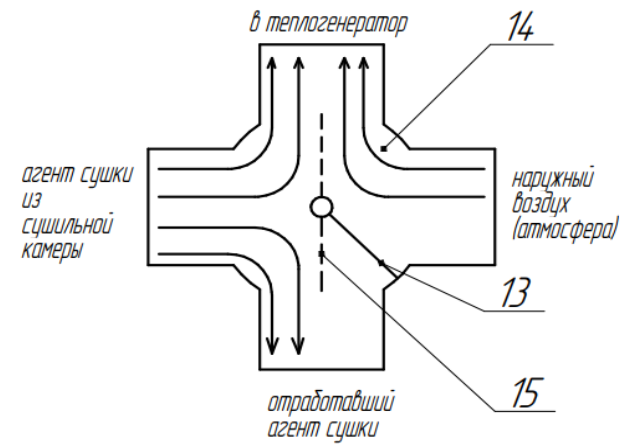


Рис. 8 - Клапан-смеситель в режиме смешивания

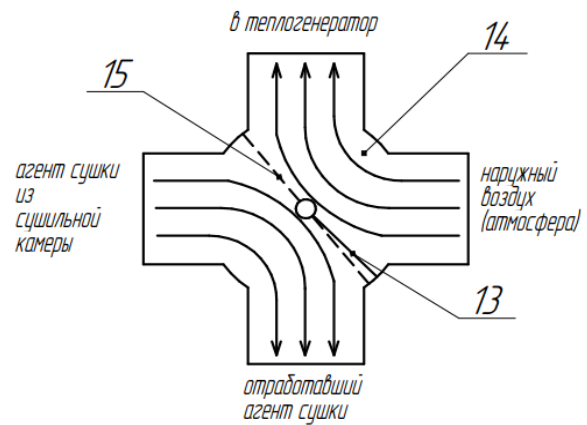
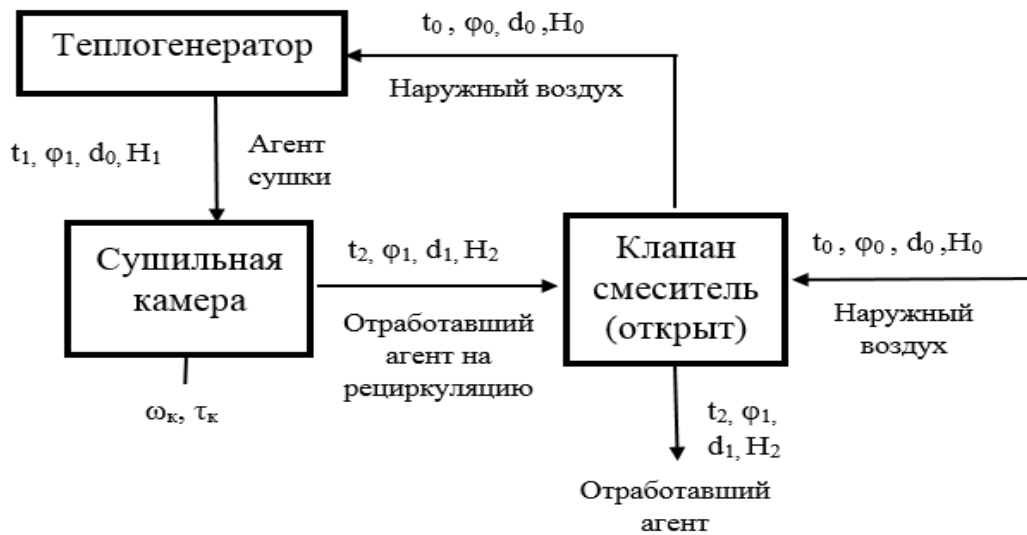


Рис. 5 - Клапан-смеситель в режиме смены теплоносителя



Теоретически обоснована теплотехническая эффективность рециркуляции сушильного агента.

На рис. 6, 7, 8 отображены схемы работы системы рециркуляции агента сушки при: полной смене агента; рециркуляции агента; рециркуляции агента с подмешиванием наружного воздуха.



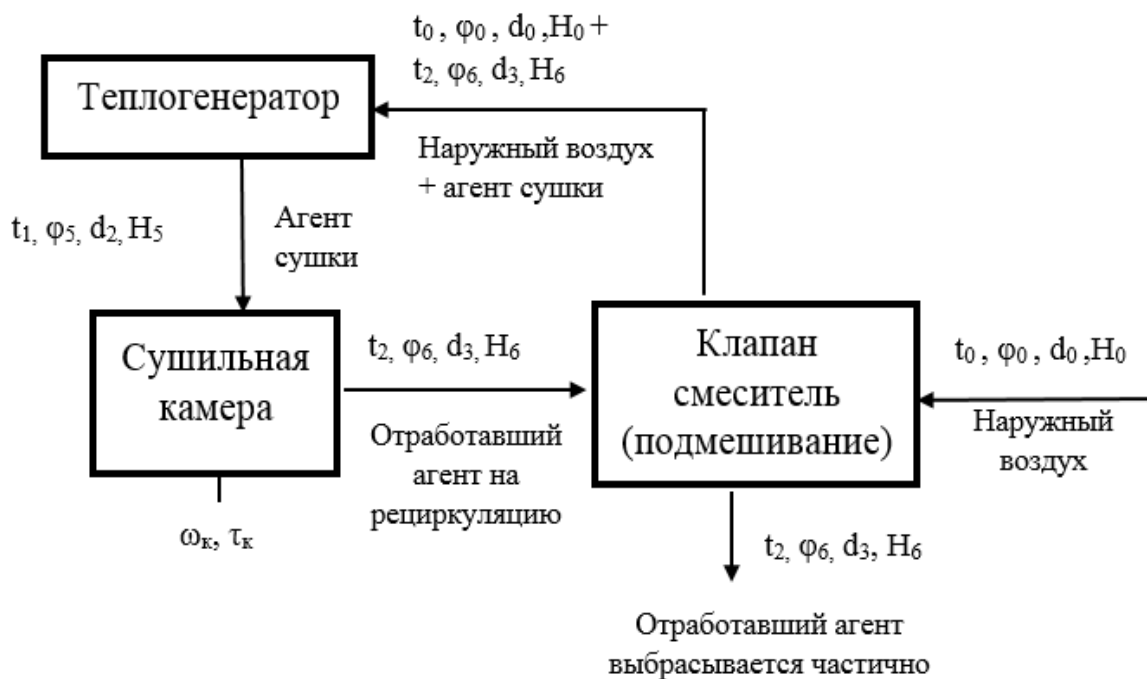
$t, \varphi, d, H$  - соответственно температура, относительная влажность, влагосодержание и энтальпия воздуха;  $\omega, \tau$  - влажность и температура зерна

Рис. 6 - Схема работы системы рециркуляции агента сушки при полной его смене



$t, \varphi, d, H$  - соответственно температура, относительная влажность, влагосодержание и энтальпия воздуха;  $\omega, \tau$  - влажность и температура зерна

Рис.7 – Схема работы системы рециркуляции агента сушки при повторном использовании агента



$t, \varphi, d, H$  - соответственно температура, относительная влажность, влагосодержание и энтальпия воздуха;  $\omega, \tau$  – влажность и температура зерна.

Рис. 8 Схема работы системы рециркуляции агента сушки с подмешиванием наружного воздуха

Теоретический расчет позволил получить результаты по следующим видам подмешиваний: постоянное подмешивание к отработавшему агенту сушки 10-40% свежего воздуха; однократное подмешивание к отработавшему агенту сушки 10-40% свежего воздуха после определенного цикла сушки. Для каждого вида подмешиваний проведен графоаналитический анализ целесообразности подмешивания свежего воздуха при повторном использовании агента сушки на основе диаграммы тепловлажностного состояния воздуха, разработанной профессором Л.К. Рамзиным

В качестве примера приведена методика и результаты повторного использования агента сушки при постоянном подмешивания свежего воздуха в объёме 10% и нагреве агента до 70 °С.

Нанесем на  $H-d$  диаграмму по 5 циклов сушки (1 цикл - исходные значения без подмешивания, остальные 4 при постоянном подмешивании).

Один цикл равен одному пропуску через зерно агента сушки (см. пример на рис. 9).

### **Первый цикл (исходные значения без помешивания)**

*Входные параметры для 1 цикла:*

Наружный воздух при температуре  $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  (согласно ОСТ 10 10.1-2002) и относительной влажности  $\phi_0 = 70 \%$  (из исходных данных), - точка **A<sub>1</sub>** на диаграмме: влагосодержание  $d_0 = 4 \text{ г/кг с.в.}$ ; энтальпия  $H_0 = 15,91 \text{ кДж/кг с.в.}$

*Рабочие параметры для 1 цикла:*

Нагрев воздуха в теплогенераторе при  $d = const$  до температуры  $t_1 = 70^\circ\text{C}$ , - точка **B<sub>1</sub>** на диаграмме: влагосодержание  $d_1 = 4 \text{ г/кг с.в.}$ ; энтальпия  $H_1 = 81,22 \text{ кДж/кг с.в.}$  Сушка (испарение) в теоретическом процессе при  $H = const$  до относительной влажности  $\phi_2 = 70 \%$ .

*Выходные параметры для первого цикла:*

На диаграмме точка **C<sub>1</sub>**: влагосодержание  $d_2 = 19,64 \text{ г/кг с.в.}$ ; энтальпия  $H_2 = 81,22 \text{ кДж/кг с.в.}$

### **Второй цикл (подмешивание)**

Значения точки A<sub>2</sub> начального влагосодержания и энтальпии смеси будем определять по известным зависимостям [справочное пособие влажный воздух]:

$$d_3 = \frac{G_{c1} \cdot d_1 + G_{c2} \cdot d_2}{G_{c1} + G_{c2}};$$

$$H_3 = \frac{G_{c1} \cdot H_1 + G_{c2} \cdot H_2}{G_{c1} + G_{c2}}$$

где  $d_3$ - влагосодержание смеси,  $\text{г/кг с.в.}$ ;

$H_3$  – энтальпия смеси,  $\text{кДж/кг с.в.}$ ;

$G_c$  – количество сухого воздуха, кг (исходя из известных значений влагосодержания и энтальпии вместо количества сухого воздуха будем использовать процентное соотношение количества воздуха)

Рассчитаем влагосодержание и энтальпия начальной точки  $A_2$ :

$$d_0 = \frac{10\% \cdot 4 \frac{\text{г}}{\text{кг с.в.}} + 90\% \cdot 19,5 \frac{\text{г}}{\text{кг с.в.}}}{10\% + 90\%};$$

$$H_3 = \frac{10\% \cdot 14 \frac{\text{кДж}}{\text{кг с. в.}} + 90\% \cdot 80 \frac{\text{кДж}}{\text{кг с. в.}}}{10\% + 90\%}$$

*Входные параметры для 2 цикла:*

Наружный воздух при температуре  $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  (согласно ОСТ 10 10.1-2002) и относительной влажности  $\phi_0 = 70 \%$  (из исходных данных), - точка  $A_2$  на диаграмме: влагосодержание  $d_0 = 18,08 \text{ г/кг с.в.}$ ; энтальпия  $H_0 = 75,76 \text{ кДж/кг с.в.}$

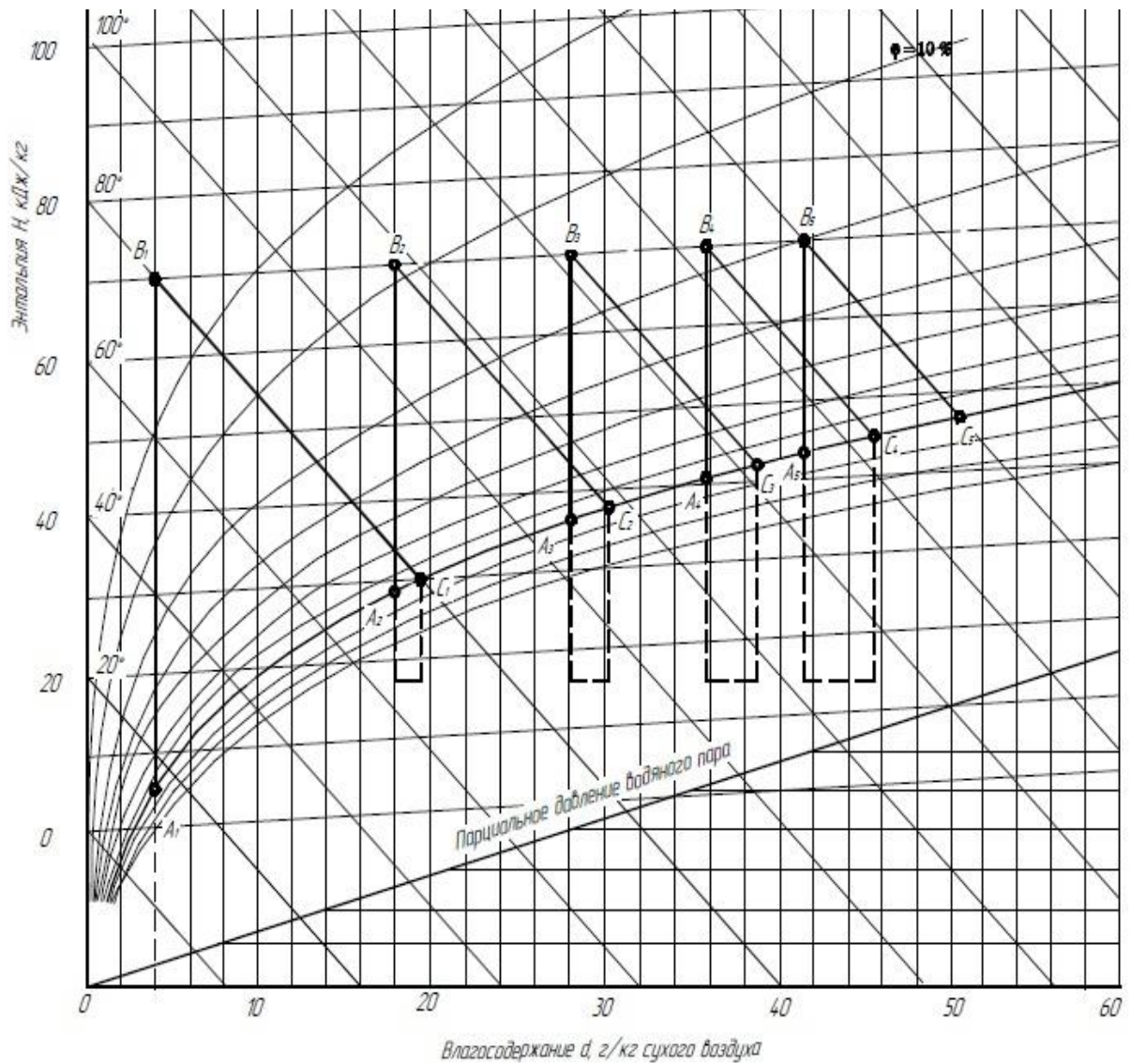
*Рабочие параметры для 2 цикла:*

Нагрев воздуха в теплогенераторе при  $d = const$  до температуры  $t_1 = 70^\circ\text{C}$ , - точка  $B_2$  на диаграмме: влагосодержание  $d_1 = 18,08 \text{ г/кг с.в.}$ ; энтальпия  $H_1 = 118,27 \text{ кДж/кг с.в.}$  Сушка (испарение) в теоретическом процессе при  $H = const$  до относительной влажности  $\phi_2 = 70 \%$ .

*Выходные параметры для 2 цикла:*

На диаграмме точка  $C_2$ : влагосодержание  $d_2 = 30,87 \text{ г/кг с.в.}$ ; энтальпия  $H_0 = 118,27 \text{ кДж/кг с.в.}$

По аналогии построим остальные три цикла сушки.



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

Рис.9 - H-d диаграмма тепловлажностного состояния воздуха при нагреве сушильного агента до  $70^\circ\text{C}$  и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

На основании всех вышеприведенных зависимостей, для обобщения всех полученных расчетных данных, отобразили графические зависимости (см. рис. 10, 11, 12, 13).

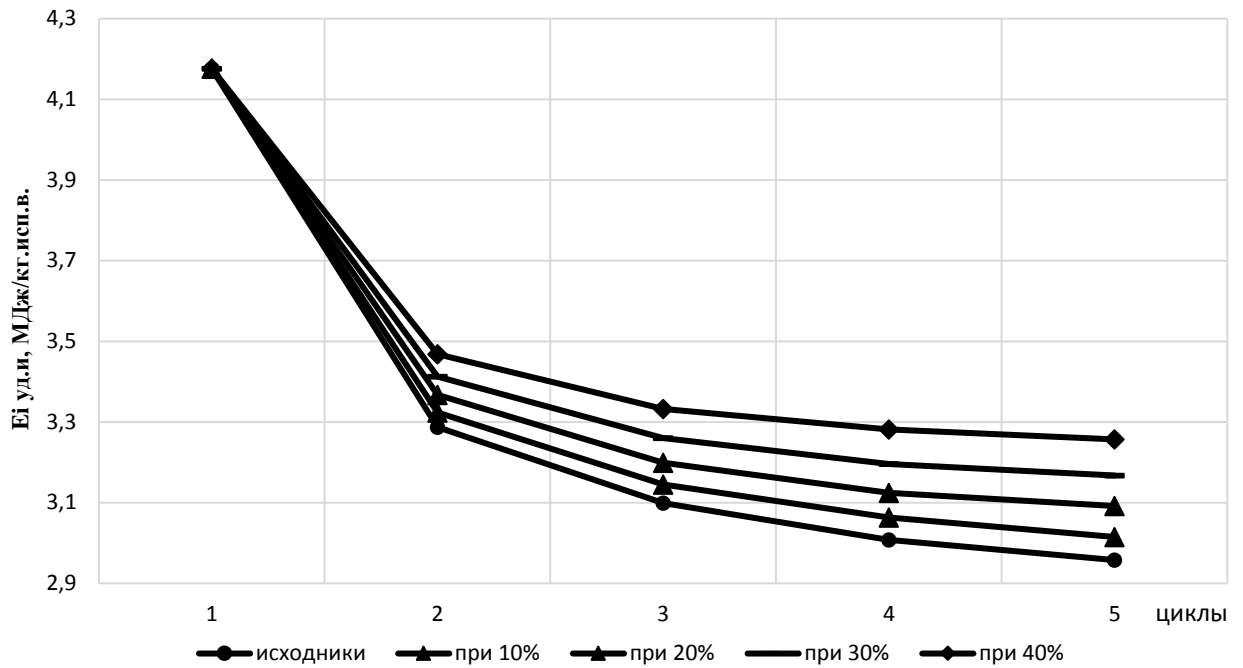


Рисунок 10 - Графические зависимости между расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента при его нагреве до 70°C и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

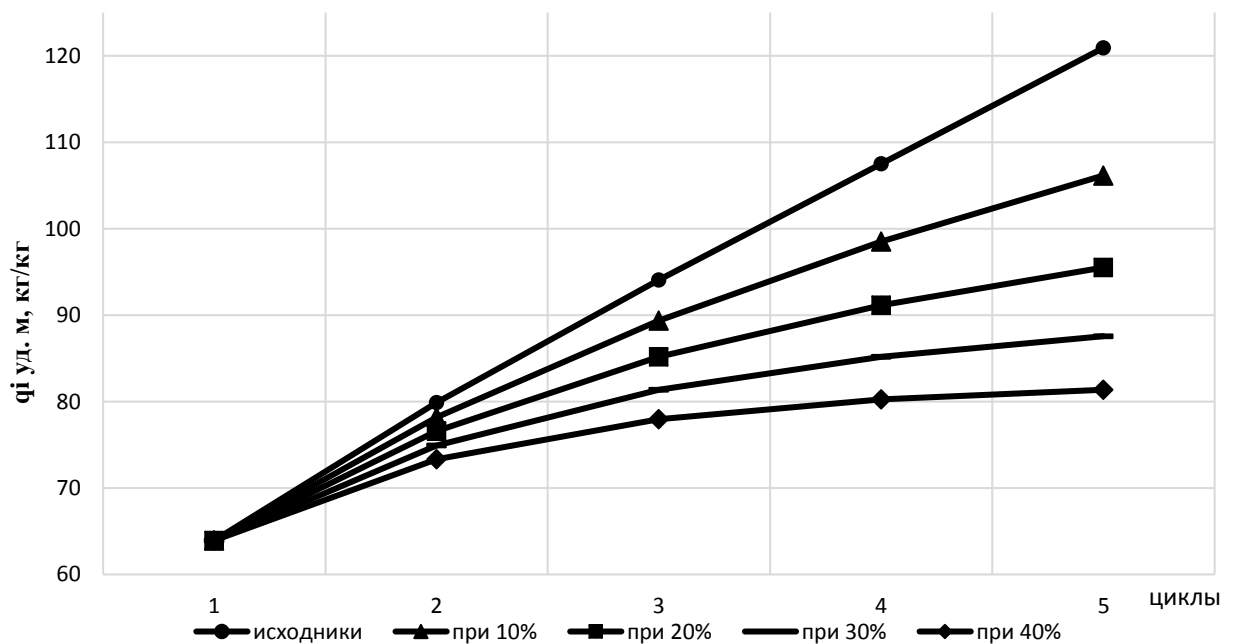


Рисунок 11 – Необходимый удельный массовый расход воздуха по циклам при нагреве агента до 70°C и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

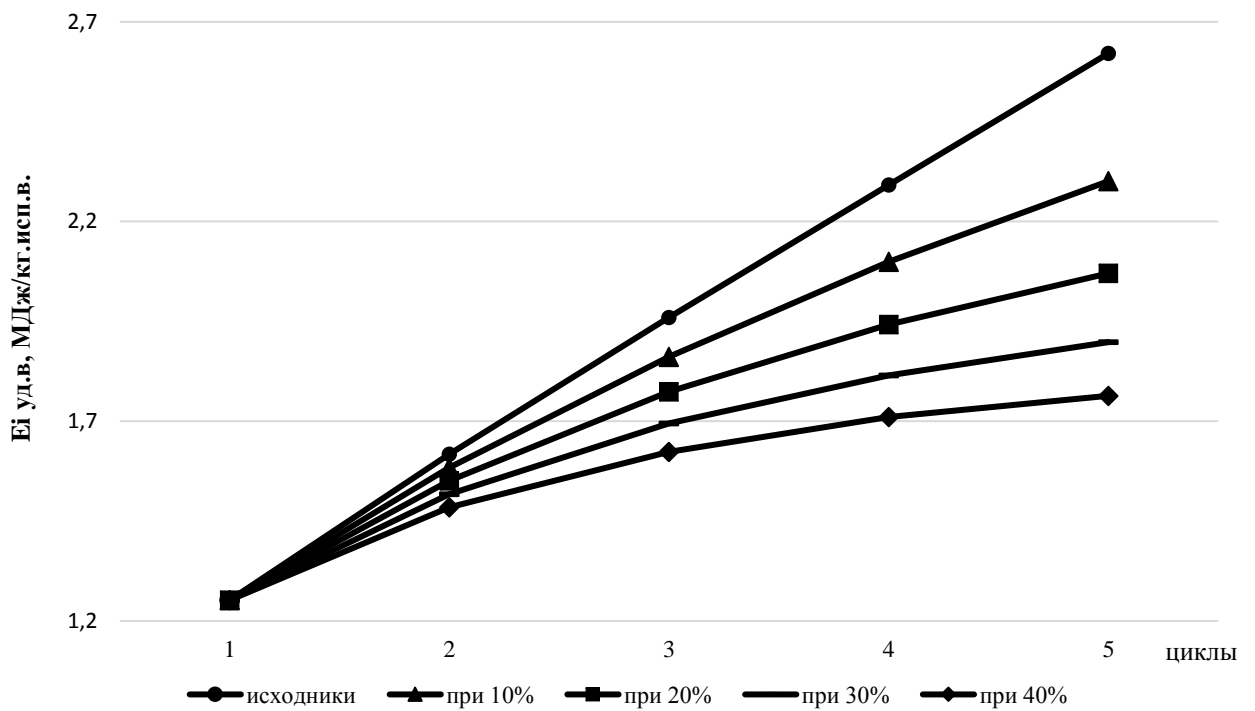


Рисунок 12 – Удельные энергозатраты на привод вентилятора по циклам при нагреве агента до 70°C и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

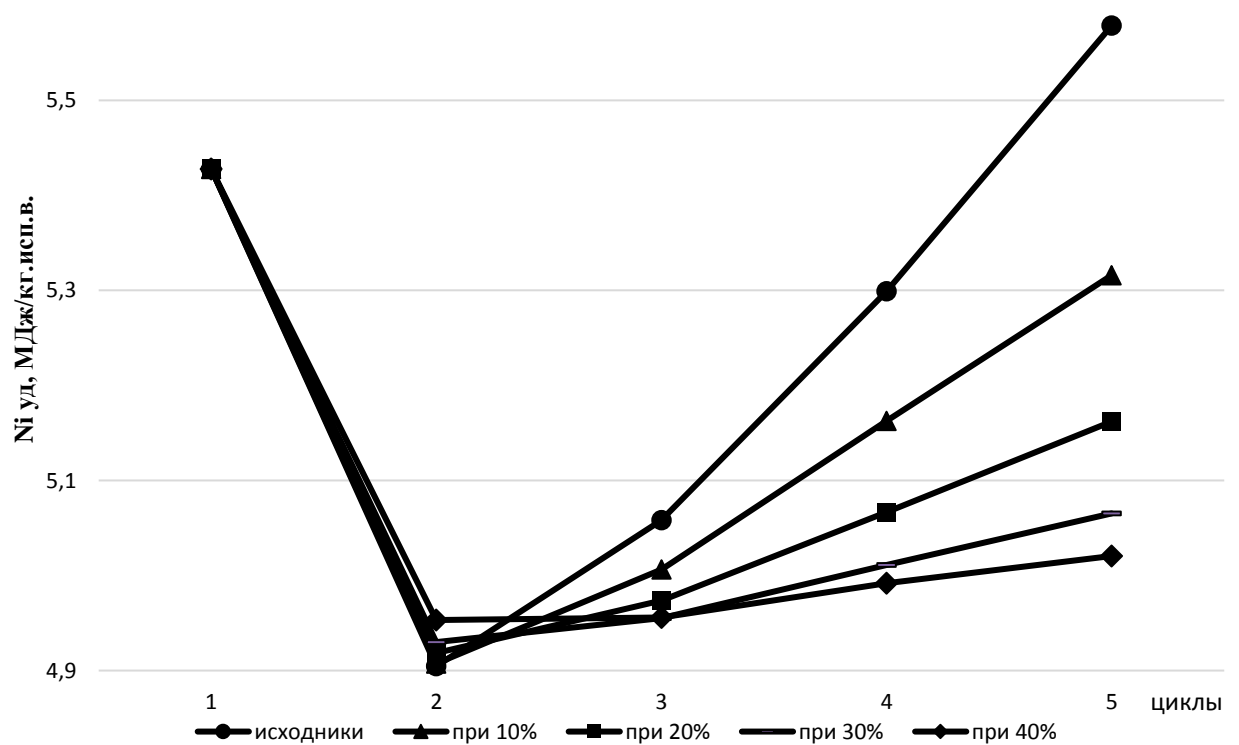


Рисунок 13 – Удельные энергозатраты (суммарные) на испарение влаги и привод вентилятора по циклам при нагреве агента до 70°C и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

Представлены рациональные значения температуры агента на выходе из сушилки и экономию суммарных энергозатрат при нагреве до 70°C.

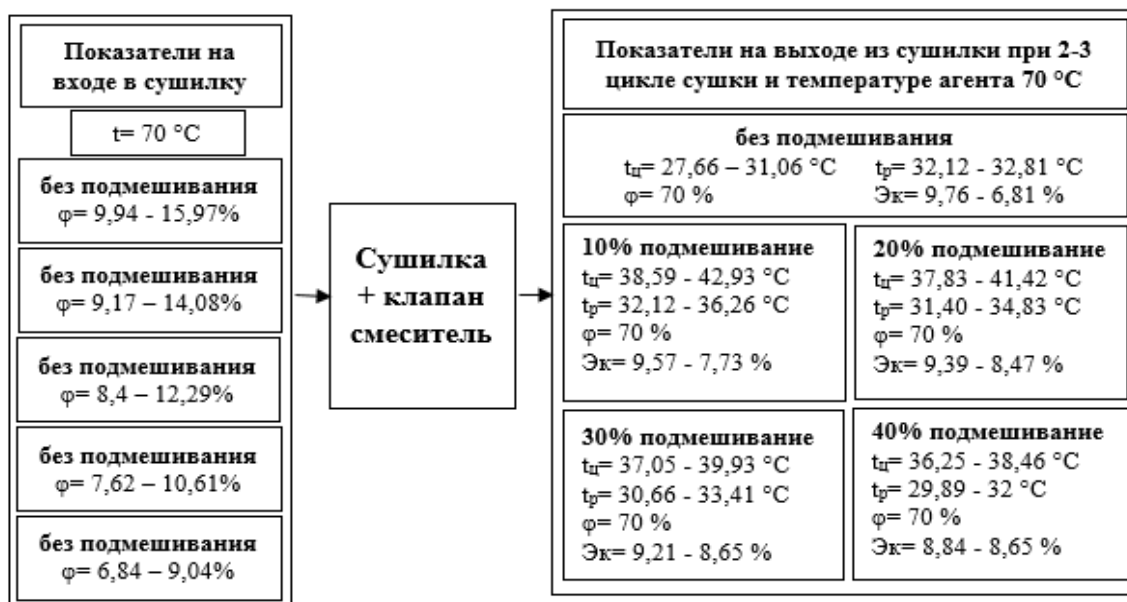


Рис.14. Рациональные значения для достижения максимальной энергоэффективности при постоянном подмешивании свежего воздуха к части отработавшего агента сушки и поддержании постоянной температуры агента 70 °C

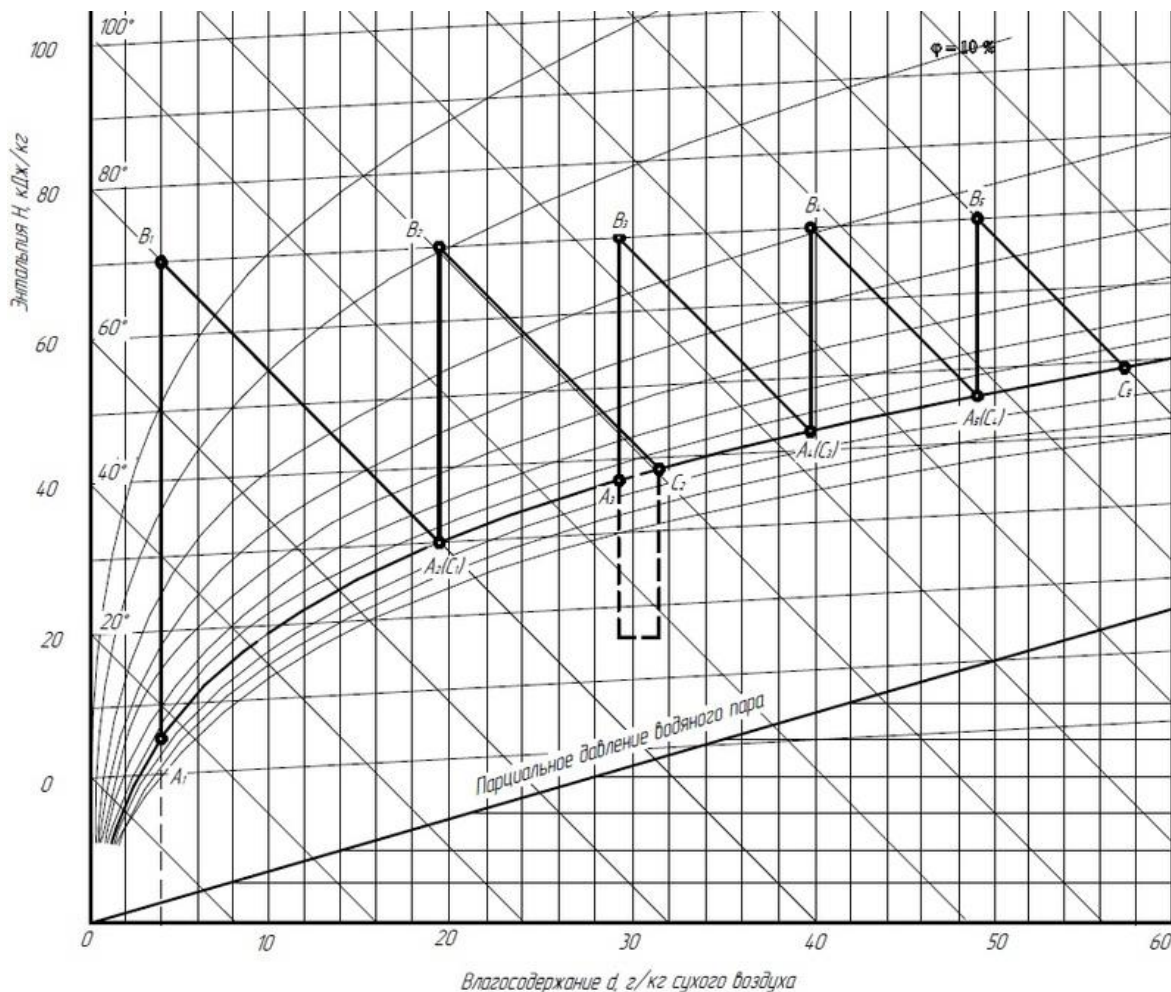
Также была необходимость проверки системы рециркуляции агента сушки при однократном подмешивании после 1,2,3,4 цикла сушки.

**В соответствии с методикой, описанной выше,** рассчитаем влагосодержание, энтальпию, а также входные, рабочие и выходные параметры циклов при однократном подмешивании определенного количества 10-40% свежего воздуха для того или иного цикла. После замыкания системы агент сушки пропускается через зерно оставшееся количество раз до достижения 5 циклов.

Для примера рассчитаем подмешивание 10% свежего воздуха к отработавшему агенту после 2 цикла сушки. Нанесем на H-d диаграмме 5 циклов (1 и 2 цикл- исходные значения без подмешивания, после 2 цикла осуществляется подмешивание 10% свежего воздуха, система замыкается, и полученный агент сушки пропускается через зерно еще 3 цикла) линий



нагрева и испарения при температуре нагрева сушильного агента 70°C (см. пример на рис. 15).



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

Рис. 15 H-d диаграмма тепловлажностного состояния воздуха при однократном подмешивании 10 % свежего воздуха после 2 цикла сушки и нагреве до 70°C

На основании всех вышеприведенных зависимостей, для обобщения всех полученных расчетных данных по однократному подмешиванию 10% свежего воздуха после 2 цикла сушки, отобразим графические зависимости (см. рис. 16, 17, 18, 19).

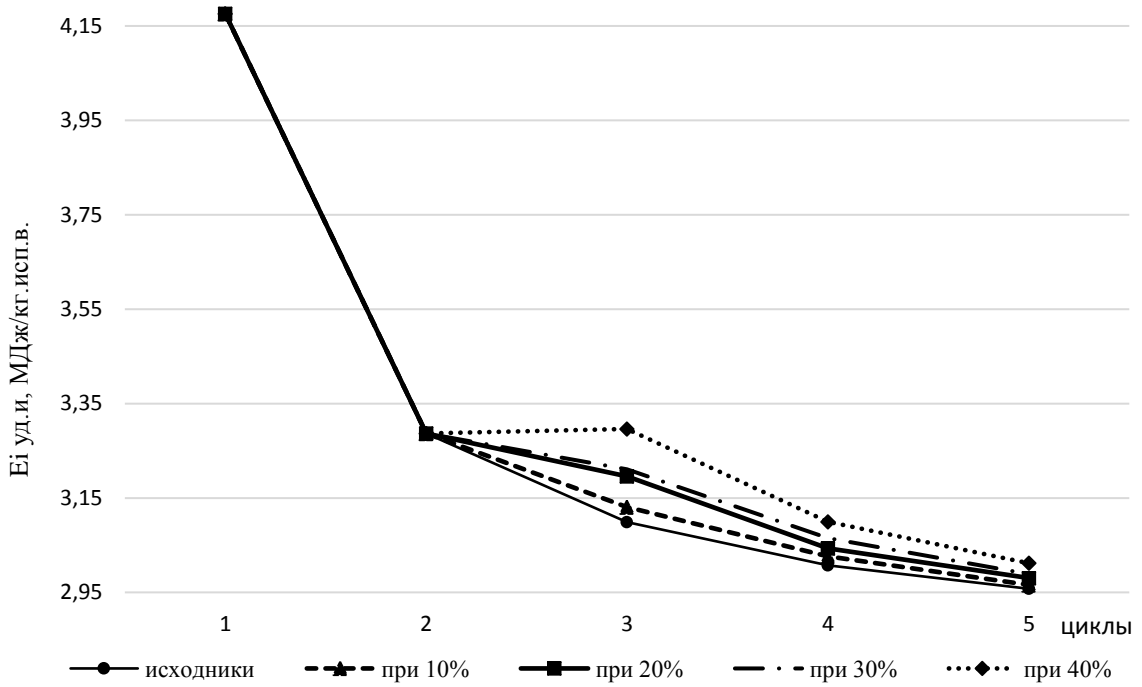


Рисунок 16 - Графические зависимости между расходом энергии на испарение влаги и количеством циклов использования сушильного агента при его нагреве до 70°C и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

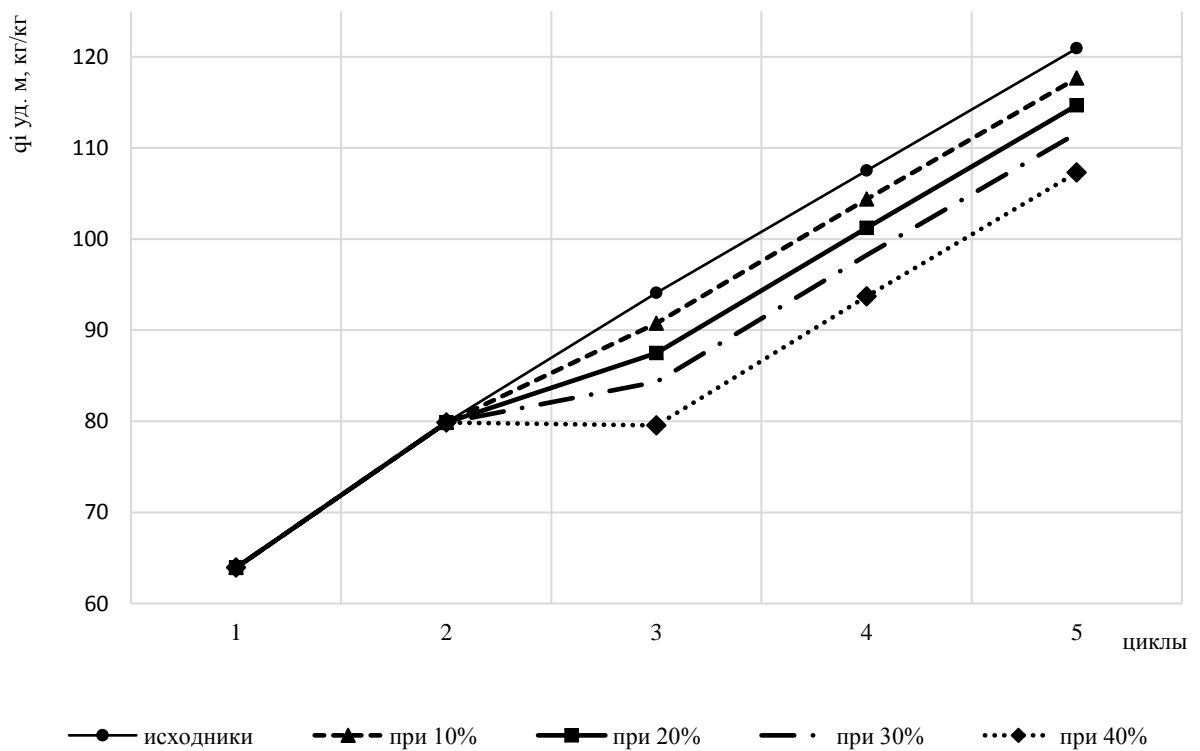


Рисунок 17 – Необходимый удельный массовый расход воздуха по циклам при нагреве агента до 70°C и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

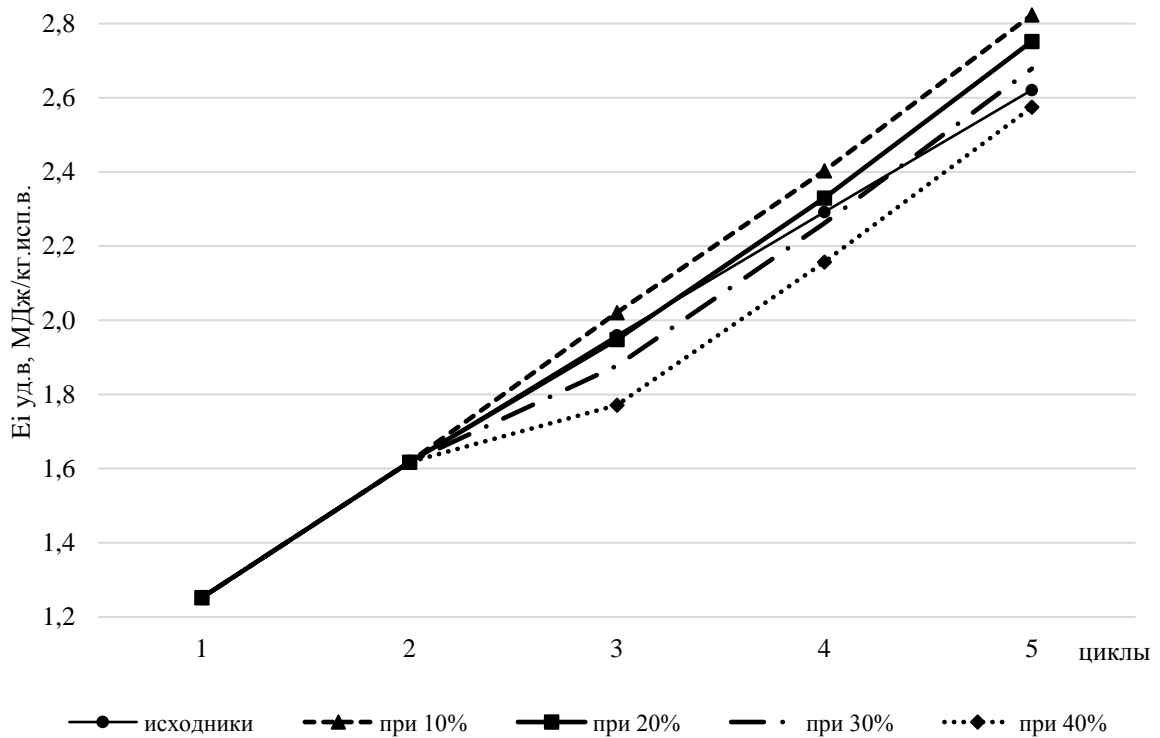


Рисунок 18 – Удельные энергозатраты на привод вентилятора по циклам при нагреве агента до 70°C и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

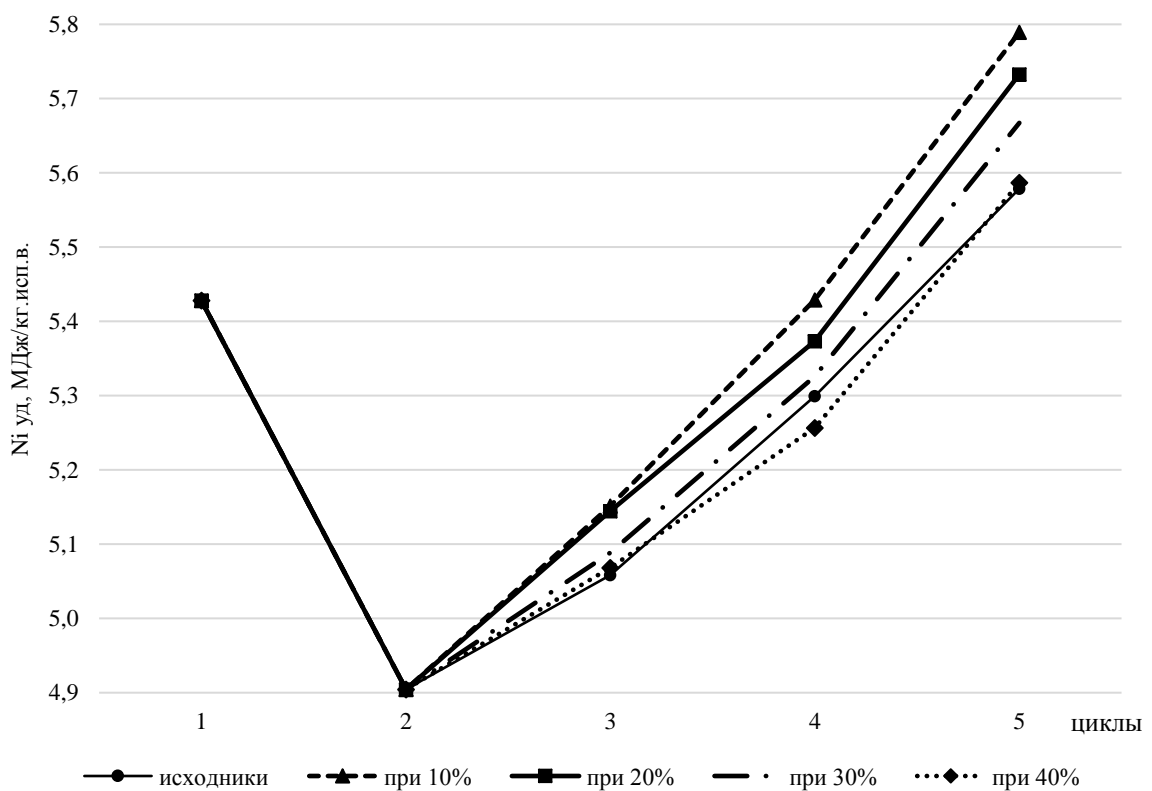


Рисунок 19 – Удельные энергозатраты (суммарные) на испарение влаги и привод вентилятора по циклам при нагреве агента до 70°C и постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

В приложении А отображены остальные результаты теоретического расчета сушки системы рециркуляции агента сушки при температуре нагрева агента до 40, 70, 100 °С при постоянном и однократном подмешивании 10-40% свежего воздуха после 1-4 циклов сушки.

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 – это температура, при которой происходит конденсация водяных паров, содержащихся в воздухе. В рассматриваемом случае **ссылаясь на теоретический расчет, приведенный выше** в качестве температуры  $t_d$ , может быть рассмотрена температура агента в конце цикла сушки.

Проведенный анализ и расчет показателей указывает на то, что температура точки росы и температура агента в конце цикла сушки должны иметь различные значения и не пересекаться для эффективности рециркуляции. Для примера на рисунке 20, приведены расчетные зависимости температуры точки росы и температуры агента в конце цикла сушки для тех же режимов, представленных ранее: температура агента 70 °С, постоянное подмешивание 10% свежего воздуха; однократное подмешивание после 2 цикла

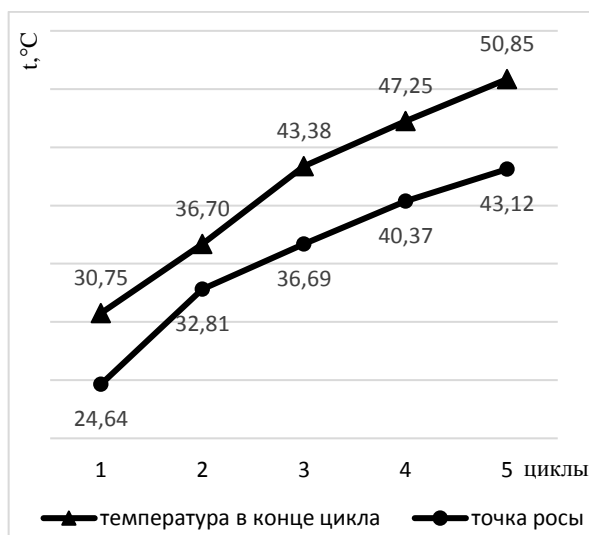
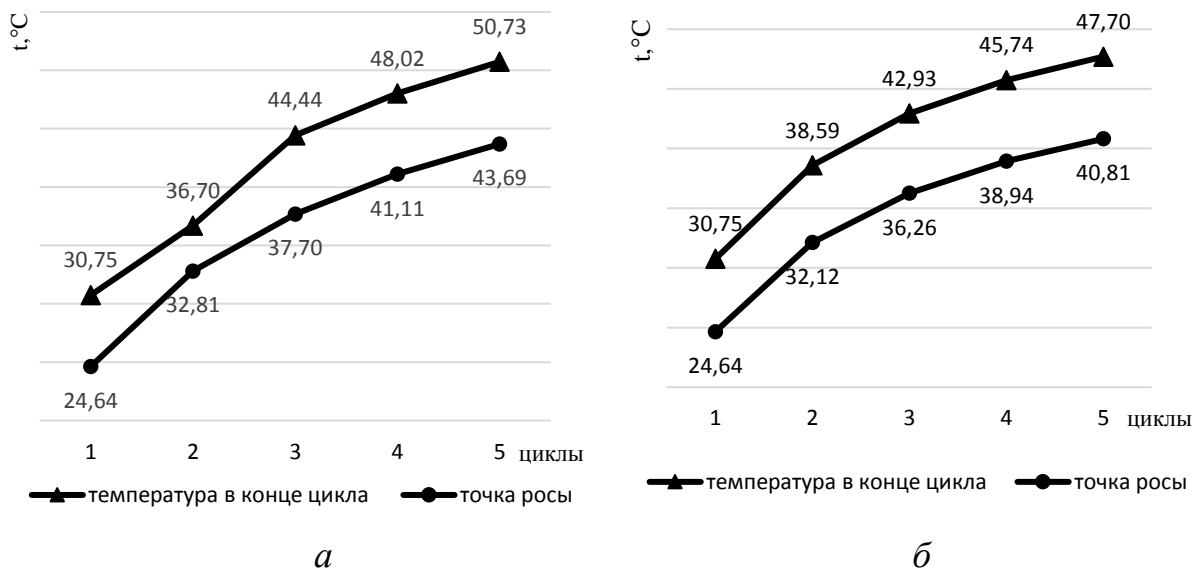


Рис. 20 - Зависимость точки росы от температуры агента сушки в конце цикла сушки при 70°: а)- при закрытом клапане; б)- при постоянном подмешивании 10% свежего воздуха; в) – после 2 цикла сушки

Все результаты теоретического расчета применения рециркуляции отработавшего агента сушки по условию конденсации влаги представлены в приложении Б

Предложена обобщенная характеристики, для оценки эффективности передвижной зерновой сушилки – «комплексный показатель совершенства

конструкции зерновой сушилки», который учитывает как удельную металлоемкость, так и удельный расход теплоты.

Разработана конструкция, обеспечивающая быстрый доступ к зерну и к любой части сушилки за счет своих сдвижного зонта и облегченному подключению.

Теоретически доказано, что конструкция и режимы сушки обеспечивают повторное использование агента без опасности выделения влаги (конденсации) внутри сушилки при пятикратном использовании.

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.

Экономичность сушки и эффективность повторного использования агента с подмешиванием к его части свежего воздуха улучшается с увеличением температуры агента сушки и может достигать от 9,57 до 13,98%

В третьей главе **«Программа и методика проведения научного исследования»** изложены программа и методика экспериментальных исследований, описание лабораторной и производственной установок. Лабораторные исследования определения аэродинамических характеристик в незагруженной камере сушки, а также методика проведения производственных испытаний системы рециркуляции агента сушки аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов при полной загрузке.

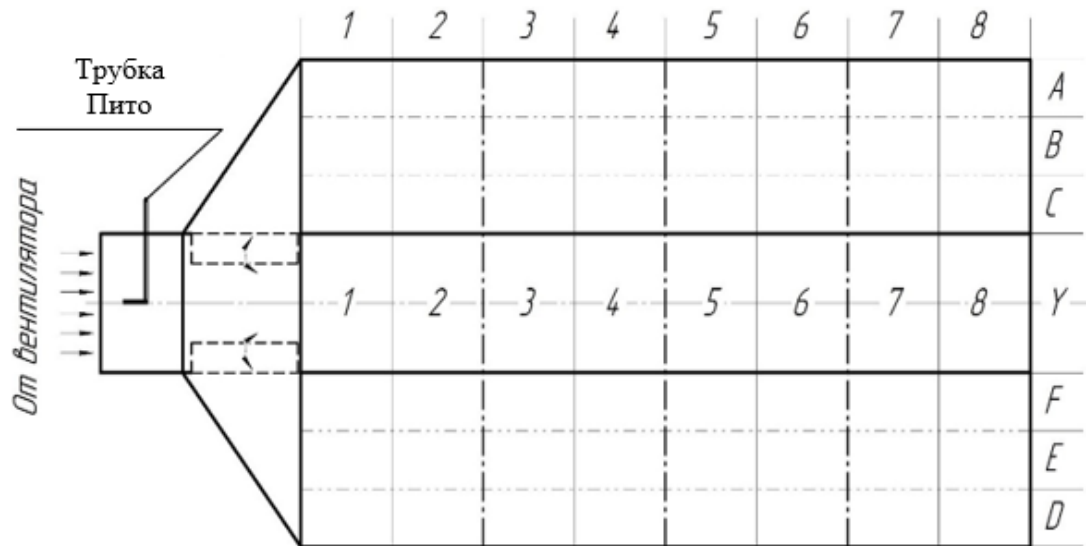
Собранный производственный образец аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов с установленной системой рециркуляции агента сушки представлено на (рис. 21), которое расположено на опытном поле ФГБОУ ВО Костромской ГСХА.



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.

Рис. 21 – Опытный образец аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов.

Для определения аэродинамических характеристик камеры сушки аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов проведем исследования распределения потоков воздуха в зависимости от положения (рис. 22, 23).



*A, B, C, Y, D, E, F* – горизонтальные плоскости замеров; *1 – 8* – ячейки замеров расхода исходящего воздуха на поверхности тканевых сит боковых воздухоподводящих полостей и жесткой перфорированной грузонесущей перегородки

Рис. 22– Схема расположения точек замера аэродинамических характеристик в камере сушки аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов.



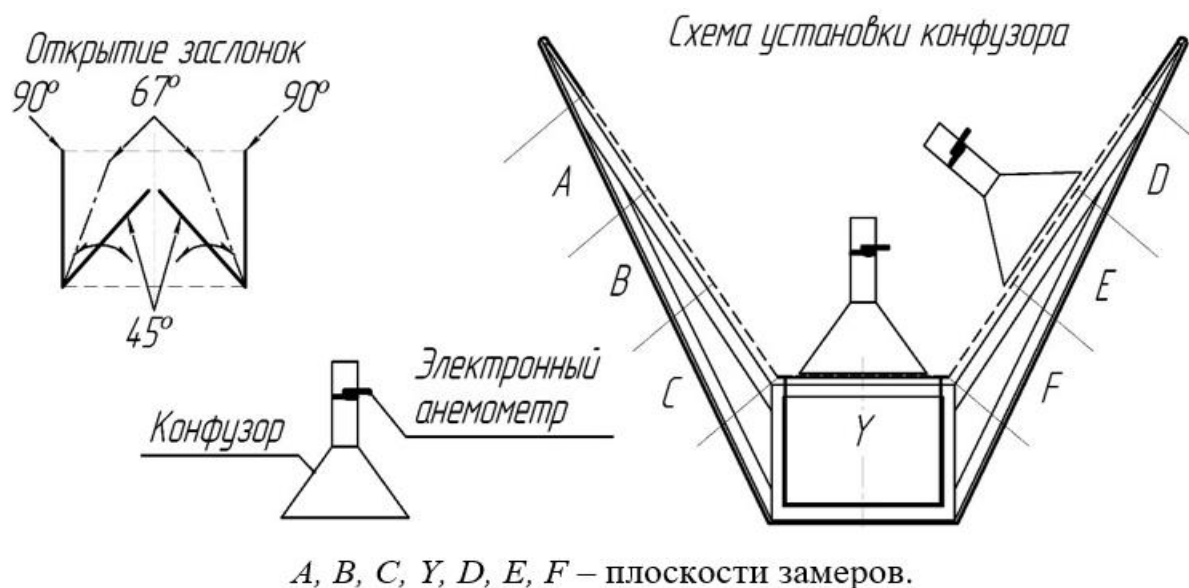


Рис. 23 Схема расположения оборудования для замера аэродинамических характеристик и величины угла открытия заслонок распределяющего воздухоподводящего патрубка.

На входе в распределяющий воздухоподводящий патрубок (рис. 26) установлены трубки Пито для определения расхода воздуха косвенным методом по многопредельному микроанометру с наклонной трубкой ММН-240, а на поверхности тканевых сит боковых воздухоподводящих полостей и жесткой перфорированной грузонесущей перегородки для определения расхода исходящего воздуха косвенным методом в ячейках 1 – 8 на плоскостях А, В, С, Y, D, E, F устанавливали конфузор с электронным анемометром UNI-T UT362.

В качестве основного фактора было принято положение поворотных заслонок, оно регулируется по углу открытия заслонок – 90° заслонки зарыты, 45° заслонки полностью открыты и 67° среднее положение заслонок (рис. 23).

В четвертой главе **«Результаты экспериментальных исследований»**

Согласно методике, был проведён однофакторный эксперимент, результаты представлены в приложении Г

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 полученных данных расхода воздуха в зависимости от положения заслонок было выполнено в редакторе электронных таблиц MS Excel и представлены на рисунках 24 – 25.

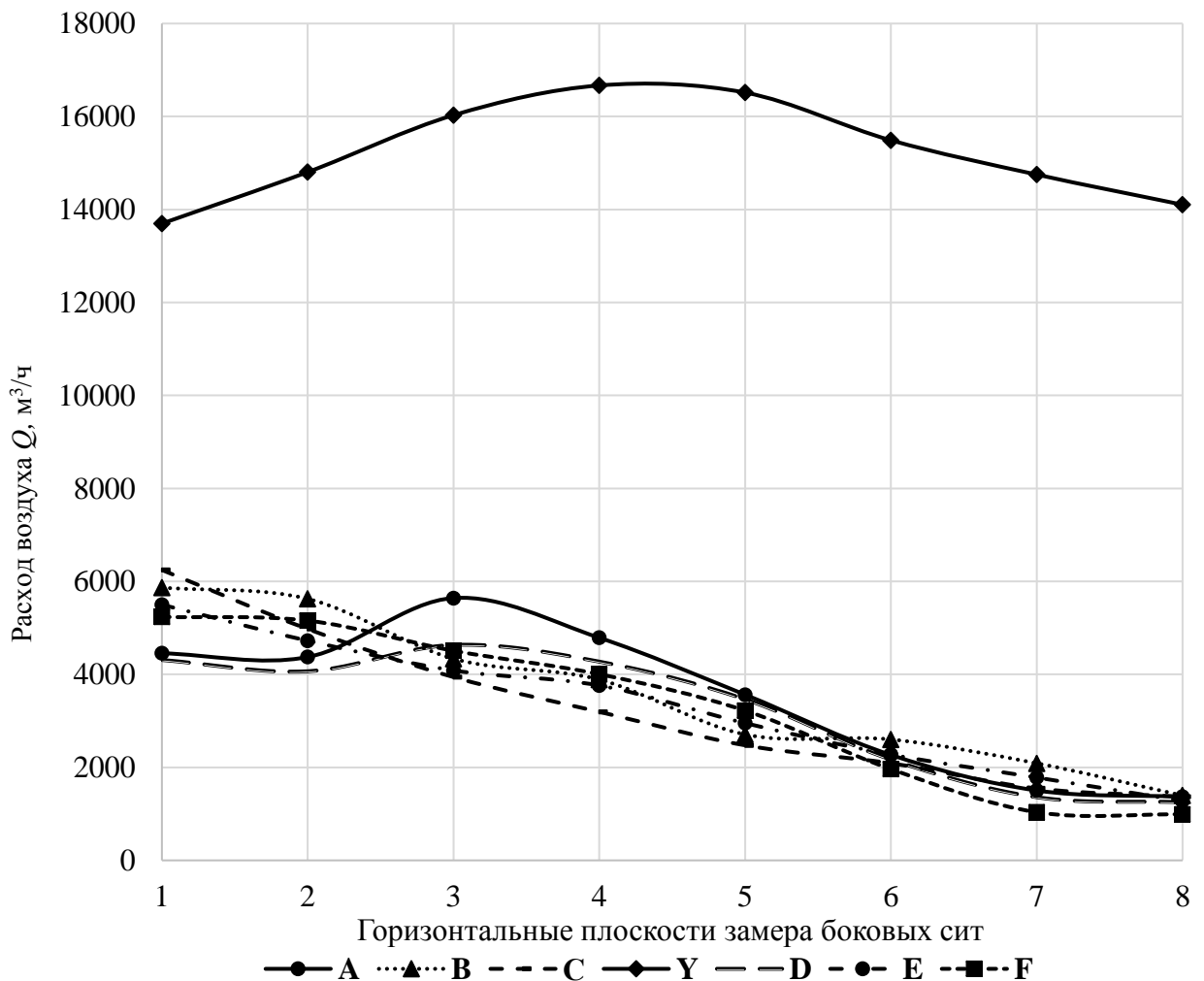


Рис. 24 – Расход исходящего воздуха на поверхности тканевых сит боковых воздухоподводящих полостей и жесткой перфорированной грузонесущей перегородки при полностью открытых заслонках

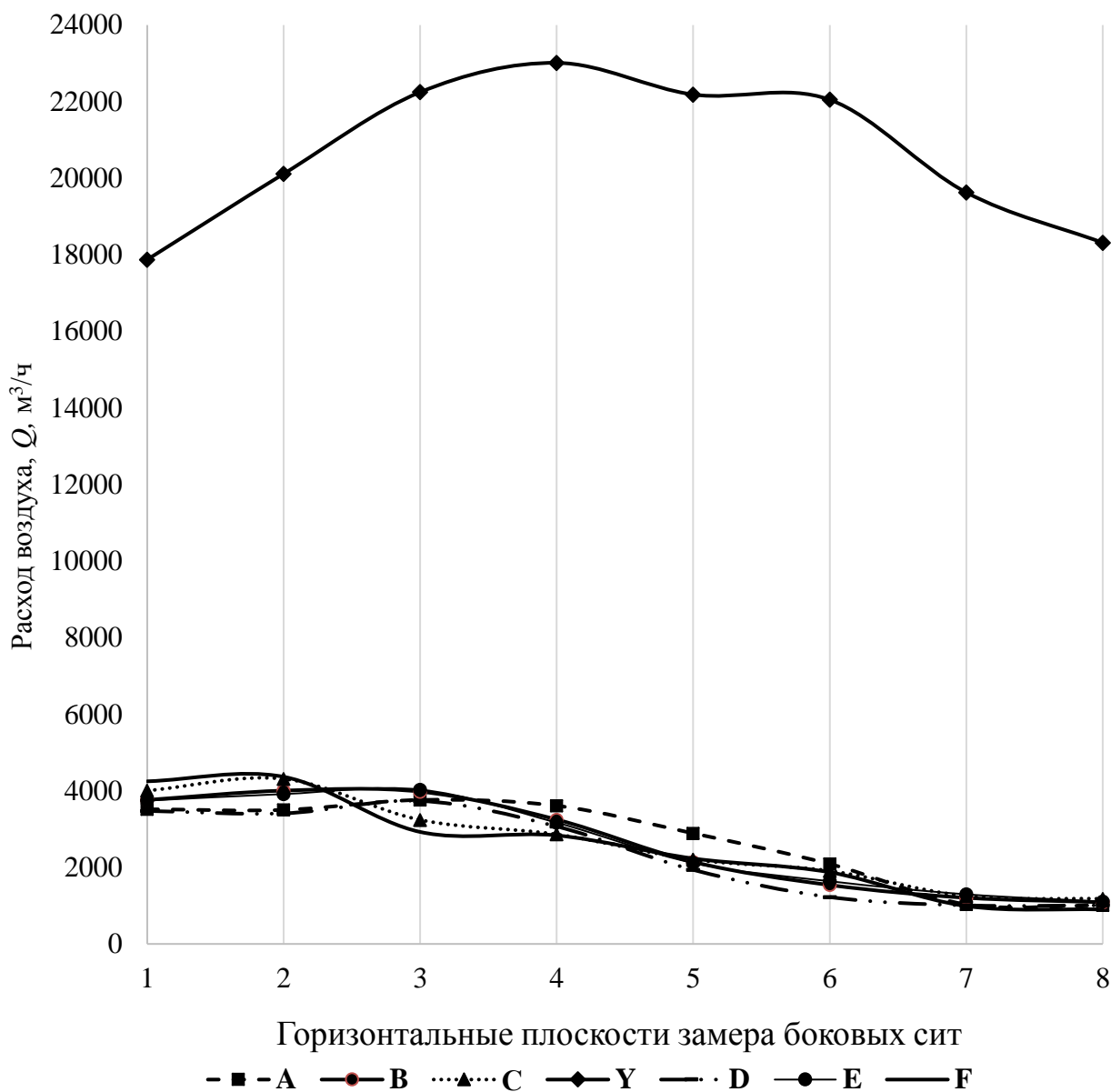
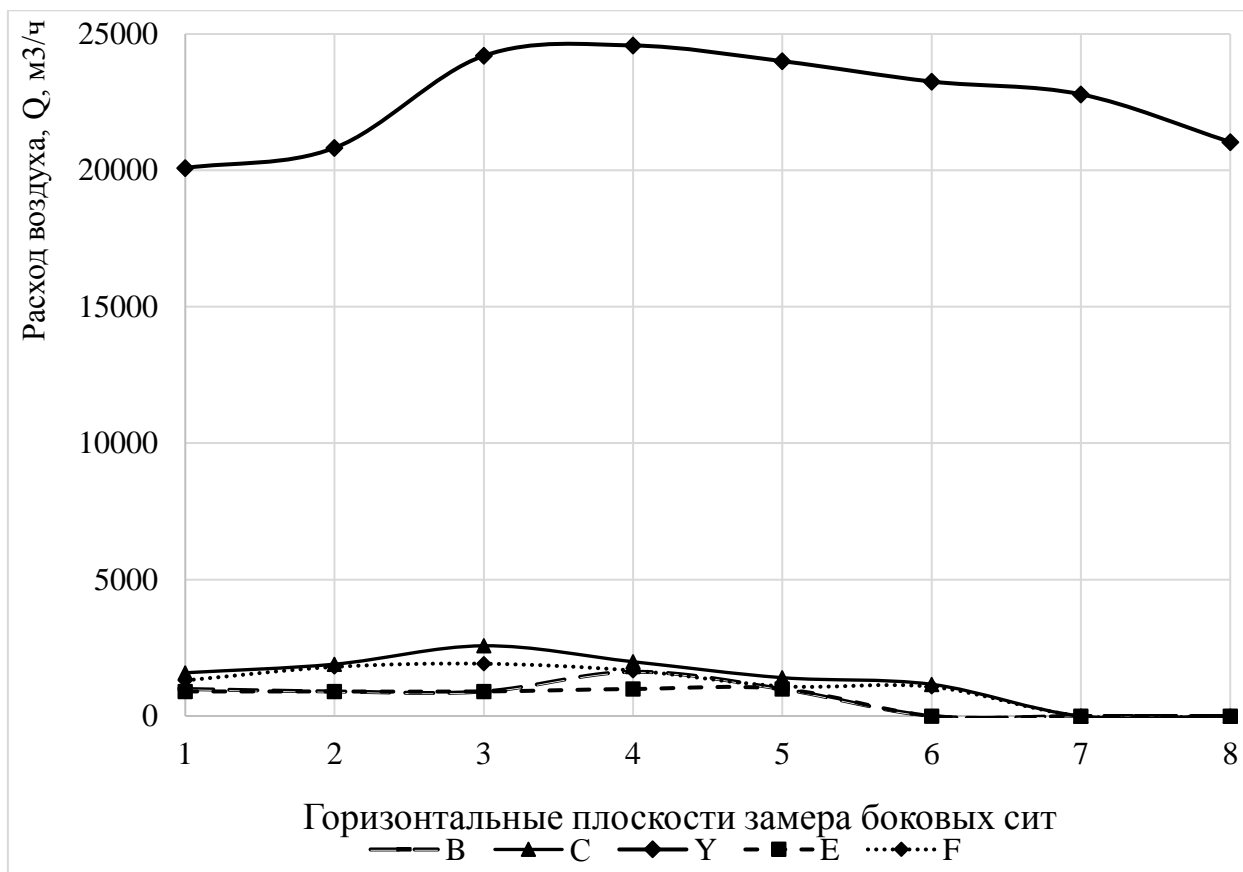


Рис. 25 – Расход исходящего воздуха на поверхности тканевых сит боковых воздухоподводящих полостей и жесткой перфорированной грузонесущей перегородки при среднем положении заслонок

Из полученных графиков представленных на рисунках 24 и 25 видно, что расхода воздуха из жесткой перфорированной грузонесущей перегородки (плоскость - Y) при открытых заслонках выше чем из боковых воздухоподводящих полостей, это связано с высоким живым сечением тканевых сит, что приводит к резкому снижению скорости воздуха в месте замера, по причине выхода воздуха по пути наименьшего сопротивления.



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

Рис. 26 – Расход исходящего воздуха на поверхности тканевых сит боковых воздухоподводящих полостей и жесткой перфорированной грузонесущей перегородки при среднем положении заслонок

Из всех полученных графиков видно, что расход воздуха в средней части жесткой перфорированной грузонесущей перегородки (плоскость - Y) выше чем в начале и в конце, это связано с падением скорости воздуха в результате эжекции в начале грузонесущей перегородки и падением скорости воздуха в конце перегородки из-за отсутствия зернового вороха на грузонесущей перегородке.

При этом из рисунков 24 и 25 видно, что подсоса воздуха в начале боковых воздухоподводящих полостей нет, а падение скорости ближе к

выгрузному отверстию связано с высоким живым сечением тканевых сит и отсутствием зернового вороха в камере сушки.

В связи с необходимостью измерений равномерности распределения воздушного потока в системе рециркуляции аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов исследования проводились в два этапа.

1 этап - исследование распределения потоков воздуха в составляющих работающей системы рециркуляции отработавшего агента сушки аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов в точках 10-16 (рис.3.19), в зависимости от положения поворотной заслонки клапана-смесителя.

В качестве основного фактора во время обоих этапов исследования принято положение поворотной заслонки клапана-смесителя  $L$ , оно регулируется по точкам I – заслонка закрыта (полная рециркуляция отработавшего агента сушки), II – среднее положение (50% -я рециркуляция), III – заслонка открыта (полная замена агента сушки). Для сравнения эффективности системы также проведем эксперимент без включенной системы рециркуляции с открытым зонтом.

Опыт будет проводиться следующим образом: запускаются вентиляторы 2, 5 и теплогенератор 1 (рис.25), исходя из теоретических расчетов проводимых для системы рециркуляции отработавшего агента сушки, температуру агента сушки установим на уровне  $70^{\circ}\text{C}$  для максимальной эффективности и экономичности процесса. заслонки в распределяющем воздухоподводящем патрубке устанавливаем в полностью открытое положение – режим вентилирования (рис.27). После выхода на режим, устанавливается необходимое положение заслоноки клапана-смесителя (рис.31), замеряем скорости и напоры воздушных потоков согласно схемам замера, в воздухоподводящих патрубках и воздуховодах, в точках 1 – 3 (рис.31), установлены трубки Пито для определения расхода воздуха косвенным методом. В точках 4, 5 (рис. 3.19) измерения расхода

воздуха проводили с помощью термоанемометра Testo 425. В точках 6,7 (рис. 31) измерения расхода воздуха проводили с помощью электронным анемометром Testo 410-2. Площадь поверхности материала составляет 15 м<sup>2</sup>.

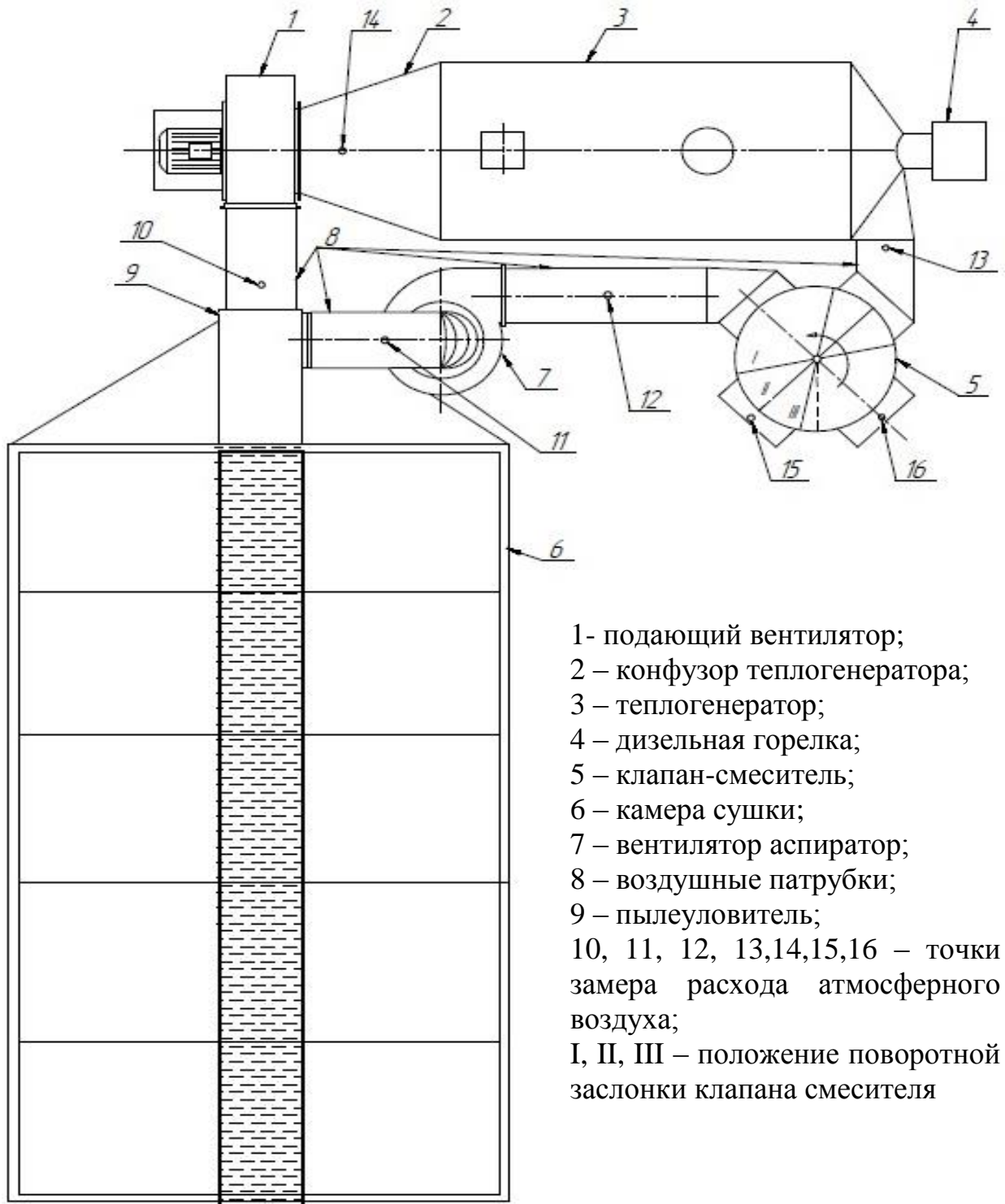
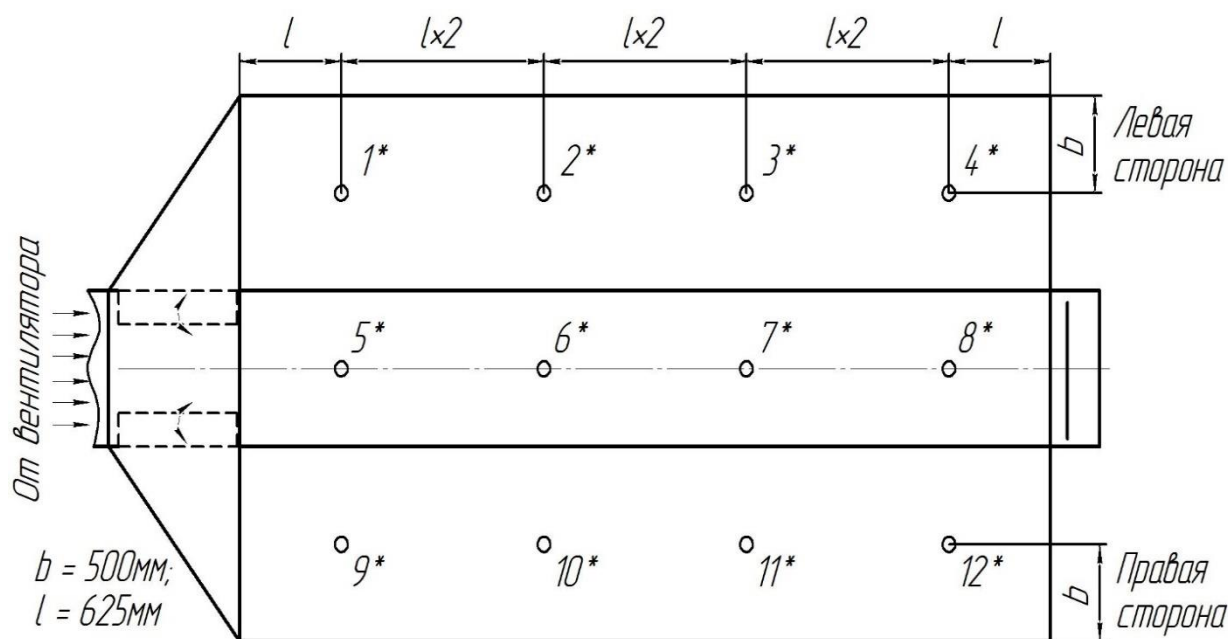


Рис. 31 – Схема расположения составляющих системы рециркуляции аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов

2 этап - исследование распределения воздушных потоков по поверхности материала в камере сушки работающей системы рециркуляции отработавшего агента сушки аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов в точках  $1^* \dots 12^*$  в соответствии со схемой (рис. 32) в зависимости от положения поворотной заслонки клапана-смесителя.



$1^* - 12^*$  – точки замера влажности и расхода отработавшего агента сушки на поверхности материала

Рис. 32– Схема точек замера влажности и расхода отработавшего агента сушки на поверхности материала заполненной камере сушки аэродинамического устройства для сушки сыпучего материала

Начало 2 этапа будет проводиться аналогично 1 этапу, после выхода на режим замеряем скорости и напоры воздушных потоков в камере сушки при этом на поверхности материала (березовой щепы, зернового вороха и семян трав) для определения расхода исходящего воздуха в точках  $1^* \dots 12^*$  в соответствии со схемой (рис.32) установим конфузор с электронным анемометром UNI-T UT362. Конфузор пирамидальной формы с основанием  $500 \times 500$  мм и высотой 500 мм, к которому закреплен воздуховод диаметром 120 мм и длиной 400 мм, внутри установлена крыльчатка электронного анемометра UNI-T UT362 .

Для определения равномерности прогрева березовой щепы, зернового вороха и семян трав в точках  $1^* \dots 12^*$  в соответствии со схемой (рис. 32) замерим температуру поверхности электронным измерителем температуры в точках, проведем измерения температуры агента сушки. Также в точках  $1^* \dots 12^*$  произведем отбор проб березовой щепы, зернового вороха и семян трав для измерения влажности на поверхности материала. Измерения проводим через каждые 3 часа. После проведения экспериментов подсчитываем средние значения полученных результатов, которые приведены в таблицах приложения Д.

В соответствии с принятой программой производственные испытания проведены на опытном образце аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов с установленной системой рециркуляции агента сушки (рис. 25), установленном на опытном поле ФГБОУ ВО Костромской ГСХА, при этом камеру сушки заполнили березовой щепой средней фракции  $4 \times 10$  мм с начальной средней влажностью 28% (рис. 4.5), при этом исследовалась равномерность распределения воздушного потока через материал без системы рециркуляции и с работающей системой рециркуляции отработавшего агента сушки при разных положениях поворотной заслонки.

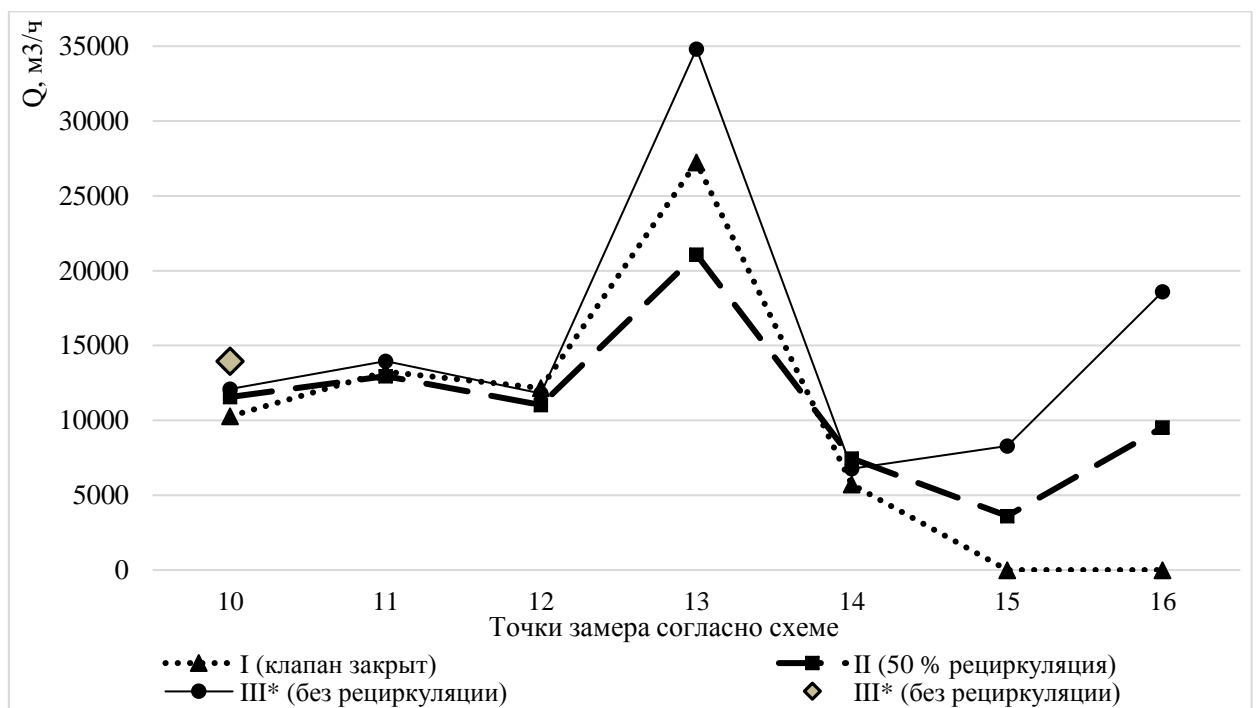
Выходной величиной (откликом) являлся: расход атмосферного воздуха,  $Q_{н.в.}$ , м<sup>3</sup>/ч (в точках 4, 7 в зависимости от положения заслонки); расход агента сушки  $Q_{a.c.}$ , м<sup>3</sup>/ч (в точках 1, 5); расход воздуха после прохождения через материал,  $Q_{к.}$ , м<sup>3</sup>/ч, (снижение скорости потока воздуха); расход отработавшего агента сушки  $Q_{o.a.c.}$ , м<sup>3</sup>/ч (в точках 2, 3, 4, 6). Контролируемые факторы: температура наружного воздуха  $t_{н.в.}$ , составила  $-8$  °С; влажность воздуха  $\varphi_{н.в.}$ , 95%; влажность материала  $w_3^H$ , 28%; температура материала  $t_{3.н.}$ ,  $-5$  °С; влажность отработавшего агента сушки 99,3%.





Рис. 31 - Заполненная березовой щепой камера сушки аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов

После проведения экспериментов подсчитывались средние значения полученных результатов, которые приведены в Приложении Д



В точках 15 и 16 при положении поворотной заслонки клапана – смесителя I (закрыт) на рисунке приведены нулевые значения, так как система замкнута воздух не поступает и не выходит

Рис. 4.6 - Аэродинамические характеристики в воздуховодах работающей системы рециркуляции отработавшего агента сушки в зависимости от положения поворотной заслонки клапана смесителя и без системы

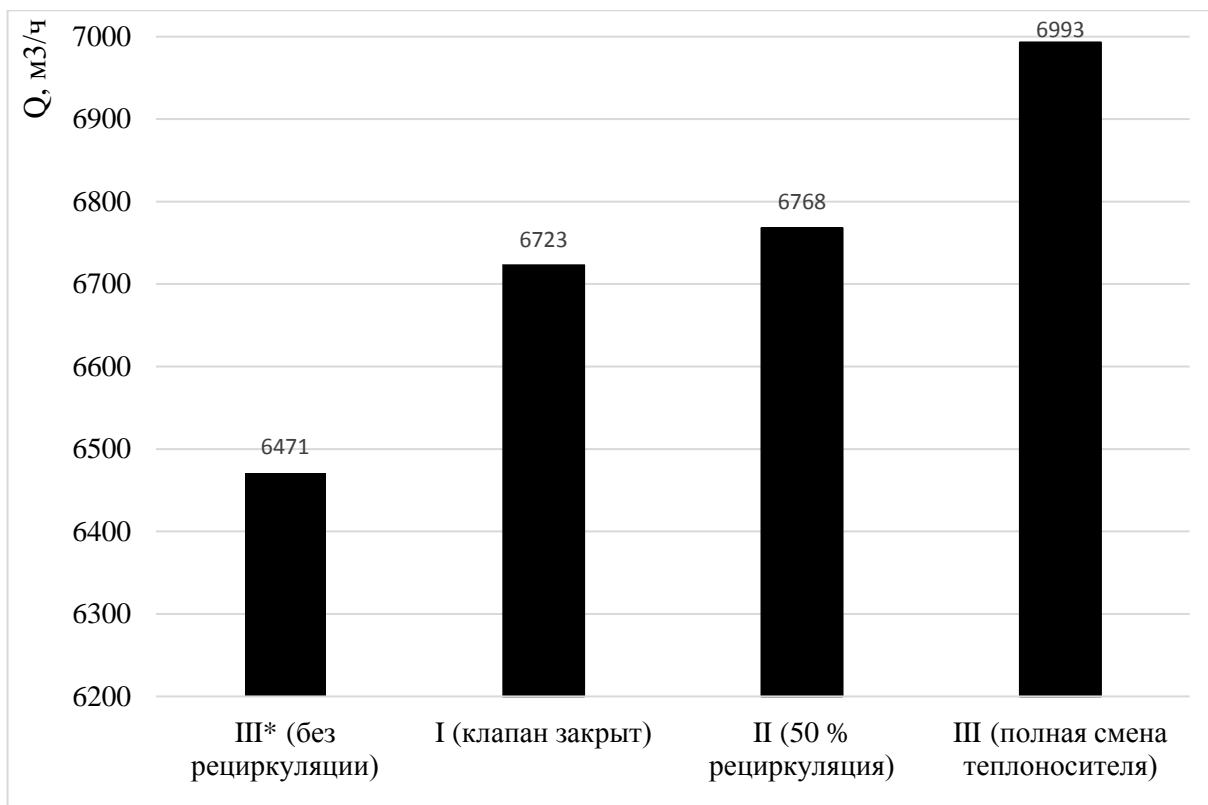


Рис. 4.8 - Сравнение средних значений расходов воздуха без системы рециркуляции и с системой при разных положениях поворотной заслонки клапана - смесителя

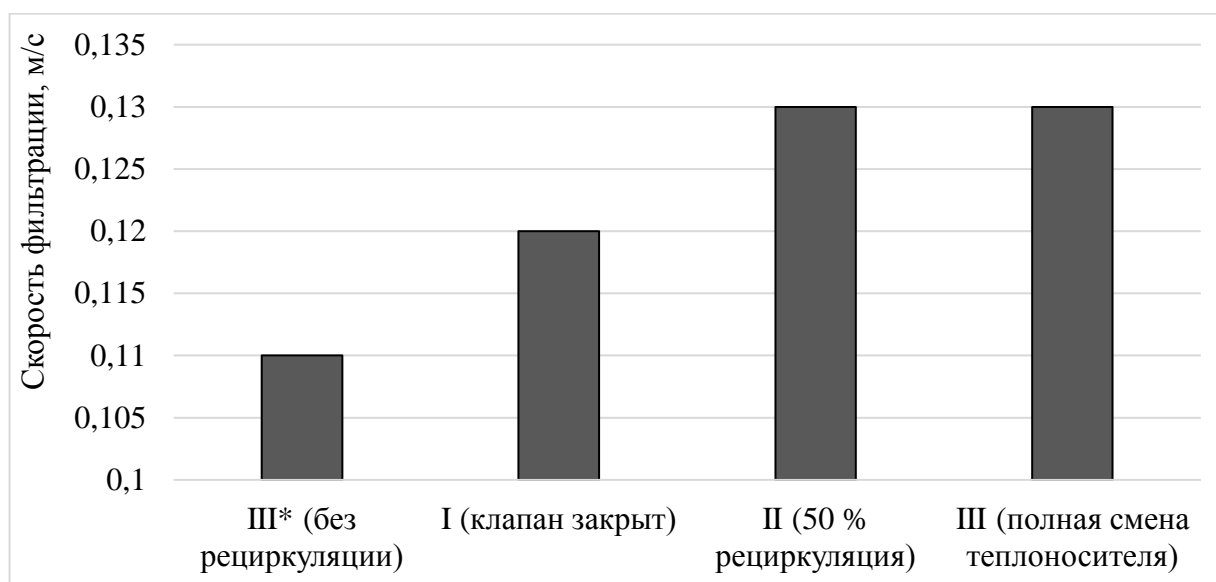


Рис. 4.9 - Сравнение значений скорости фильтрации без системы рециркуляции отработавшего агента сушки и с системой при разных положениях поворотной заслонки клапана смесителя

Анализируя полученные данные испытаний на березовой щепе можно сделать вывод о том, что использование системы рециркуляции отработавшего агента сушки оказывает положительный эффект на расход воздуха и скорость фильтрации через материал, тем самым увеличивается скорость сушки, при этом решается проблема запыления рабочей зоны. Повторить данный эксперимент планируется на различных культурах (зерновой ворох, семена трав) для сравнения эффективности работы системы рециркуляции агента сушки.

Результаты испытаний системы рециркуляции агента сушки на щепе позволили сделать следующие выводы: при положении заслонки клапана - смесителя I (закрыт), средние значения расхода воздуха выше на 3,89%, скорость фильтрации улучшится на 9,09%. При положении заслонки клапана - смесителя II (50 % рециркуляция), средние значения расхода воздуха выше на 4,59%, скорость фильтрации улучшится на 18,18%. Наилучшие показатели при положении заслонки клапана – смесителя III (полная смена теплоносителя), средние значения расхода воздуха выше на 8%, скорость фильтрации остается на том же уровне 18,18%.

В пятой главе **«Экономическая эффективность»** приведены результаты экономического расчета, по которому установлено, что применение аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов с системой рециркуляции агента сушки стоимостью 1589387,4 руб. в сравнении с базовым вариантом дешевле на 360 тыс. и эффективнее по производительности на 24,8 %. Сравнение технических характеристик сушилок показало, что затраты топлива в 2,5 раза ниже в сравнении с базовым аналогом. Годовая экономия составит 308 тыс. рублей, а срок окупаемости равен 5,15 года

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена обобщенная характеристика, для оценки эффективности передвижной зерновой сушилки – «комплексный показатель совершенства конструкции зерновой сушилки», учитывающий удельную металлоемкость конструкции и удельный расход теплоты.

2. Теоретически определены оптимальные конструктивно-технологические параметры системы рециркуляции отработавшего агента сушки и проведен тепловой расчет. Теоретически доказано: конструкция и режимы сушки обеспечивают повторное использование агента без опасности выделения влаги (конденсации) внутри сушилки при пятикратном использовании; экономичность и эффективность повторного использования агента с подмешиванием к его части свежего воздуха улучшается с увеличением температуры агента сушки и может достигать от 9,57 до 13,98%

3. Изготовлен опытный образец зерносушилки с системой рециркуляции отработавшего агента сушки, который подтвержден патентом №2777996 на изобретение. Конструкция, обеспечивает быстрый доступ к зерну за счет сдвижного зонта камеры сушки, а также быстрый доступ к любой составляющей сушилки и облегченному их подключению.

4. В результате производственных испытаний было проверена сравнение эффективности вентилирования березовой щепы без системы рециркуляции отработавшего агента и при ее работе. Протестированы режимы работы системы рециркуляции агента сушки:

- положение заслонки клапана - смесителя I (закрыт), средние значения расхода воздуха увеличилось на 3,89%, скорость фильтрации улучшилась на 9,09%;

- положении заслонки клапана - смесителя II (50 % рециркуляция), средние значения расхода воздуха увеличилось на 4,59%, скорость фильтрации улучшилась на 18,18%;

- наилучшие показатели при положении заслонки клапана – смесителя III (полная смена теплоносителя), средние значения расхода воздуха увеличилось на 8%, скорость фильтрации остается на том же уровне, что и при положении II - 18,18%.

5. Экономический анализ эффективности опытного образца передвижной зерносушилки с системой рециркуляции агента сушки, показал что на ее изготовление, приобретение дополнительного оборудования и внедрения необходимо порядка 1,5 млн. руб., что дешевле базового аналога на 360 тыс. руб. и эффективнее по производительности на 24,8%. Сравнение технических характеристик показало, что затраты топлива в 2,5 раза ниже в сравнении с базовым аналогом. Годовая экономия составит 308 тыс. рублей, а срок окупаемости равен 5,15 года.

**Рекомендации производству.** Применять разработанную систему рециркуляции агента сушки передвижного аэродинамического устройства для сушки сыпучих материалов, сельскохозяйственным предприятиям при сушке, вентилировании и временном хранении различного материала такого как зерновой ворох, семена трав и др.

**Перспективы дальнейшего развития темы.** Необходимо усовершенствование клапана-смесителя системы рециркуляции агента сушки путем внедрения рекуперативного теплообменника, что позволит уменьшить затраты на подогрев свежего воздуха.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ*

1. Коваленко Р.М. Классификация и направления совершенствования передвижных зерновых сушилок / Волхонов М.С., Мамаева И.А., Коваленко Р.М., Беляков М.М. Аграрный вестник Верхневолжья. 2021. № 3 (36). С. 53-62.

2 Коваленко Р.М. «Ультразвуковое устройство для оценки изменения состояния слоя зернового вороха при его очистке» / М.С. Волхонов, Р.М. Волхонов, Р.М. Коваленко, // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – СПб., 2020. №2 (59). С. 153-159.

*Публикации в других изданиях*

3 Коваленко Р.М. «Анализ технологий и машин для производства солода» / М.С. Волхонов, И.Ю. Сорока, И.А. Смирнов, Р.М. Коваленко, М.Г. Чуперка, // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. – Караваево Костромская ГСХА, 2020. Выпуск 90. С. 42-53.

4. Коваленко Р.М. «Анализ эффективности применения пульсаторов в различных технологических схемах» / М.С. Волхонов, М.Г. Чуперка, И.А. Смирнов, Р.М. Коваленко, И.Ю. Сорока, // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. – Караваево Костромская ГСХА, 2020. Выпуск 90. С. 42-53.

*Патенты*

7. Коваленко Р.М. Пат. 2777996 RU, МПК F26B Волхонов М.С., Смирнов И.А., Коваленко Р.М. Аэродинамическое устройство для сушки сыпучих материалов / [Текст] /заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования Костромская государственная сельхоз академия, заявл.11.06.2021, опубл. 12.02.2022