

На правах рукописи



КИРЕЕВ ВЛАДИМИР ЕВГЕНЬЕВИЧ

**РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ ЗАТВОР С ЭФФЕКТОМ КОАНДА ДЛЯ
АСПИРАЦИОННЫХ УКРЫТИЙ МЕСТНОЙ ВЫТЯЖНОЙ
ВЕНТИЛЯЦИИ**

Специальность 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Гольцов Александр Борисович

Официальные оппоненты: **Азаров Валерий Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет», заведующий
кафедрой «Безопасность жизнедеятельности в
строительстве и городском хозяйстве»

Козлов Тимур Алексеевич,
кандидата технических наук,
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный
университет имени М.К. Аммосова»
доцента кафедры «Теплогазоснабжение и
вентиляция»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Защита состоится «11» декабря 2026 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте <https://www.bstu.ru/struct/gna/kireev/1791>

Автореферат разослан « » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Денис Юрьевич Суслов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В промышленности множества технологических процессов необходимо транспортировать, перегружать и перерабатывать большие объемы сыпучих материалов. В результате этих процессов выделяется большое количество мелкодисперсной пыли, которая, попадая в область рабочей зоны, приводит к ее загрязнению и возникновению различных заболеваний у рабочих. Часто применяемой технологической операцией является перегрузка материала по закрытым желобам, при которой происходит возникновение повышенного давления воздуха в месте выгрузки по причине эжекции, а следовательно, интенсивное пылевыведение. Для предотвращения попадания запыленного воздуха в область рабочей зоны применяются различные способы, наиболее эффективным из которых является применение аспирационных систем.

Классическая компоновка аспирационной системы включает аспирационное укрытие, систему очистки воздуха и систему трубопроводов. Необходимая производительность системы аспирации в первую очередь зависит от объемов аспирируемого воздуха, что обуславливает выполнение дальнейших исследований по их снижению с одновременным повышением производительности и эффективности.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в разработку способов и средств повышения эффективности обеспыливающей вентиляции, методов расчета пылевоздушных течений, определения объемов аспирации и разработки рециркуляционных систем внесли: Азаров В.Н., Логачев И.Н., Логачев К.И., Минко В.А., Овсянников Ю.Г., Гервасьев А.М., Шелекетин А.В., Олифер В.Д., Бутаков С.Е., Аверкова О.А., Гольцов А.Б., Гурова О.С., Ежов В.С., Голышев А.М., Киреев В.М., Зиганшин А.М., Уляшева В.М., Боровков Д.П., Зайцев О.Н., Козлов Т.А. и многие другие.

Наиболее перспективным методом снижения объемов аспирации является частичная рециркуляция, при которой удаляемый воздух возвращают к источнику пылеобразования, снижая тем самым энергоемкость системы.

Проведенный анализ существующих технических решений свидетельствует о том, что современные конструкции узлов подачи рециркуляционного воздуха не исчерпывают возможности для оптимизации аэродинамических процессов в системах аспирации. Учитывая, что любое крупное промышленное предприятие использует в технологических процессах множество аспирационных систем, то разработка и исследование предлагаемого узла рециркуляции, включенного в их состав, является актуальной задачей.

Диссертация выполнена на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета в рамках исследований по гранту, полученному в конкурсе “Умник” РФ на тему «Разработка энергосберегающих технологий обеспыливания технологических процессов производства».

Научная гипотеза: применение эффекта Коанда в узле подачи рециркуляционного воздуха перегрузочных желобов позволяет создать дополнительное аэродинамическое сопротивление движению эжектируемого воздушного потока перегружаемым материалом, что обеспечивает снижение объемов аспирируемого воздуха и, как следствие, повышает эффективность системы местной вытяжной вентиляции при сохранении требуемого уровня локализации пылевыведений.

Цель работы: повышение эффективности систем местной вытяжной вентиляции путём снижения объемов аспирируемого воздуха за счёт использования усовершенствованного рециркуляционного затвора с эффектом Коанда в узлах перегрузки.

Поставленная цель определила следующие **задачи исследования:**

- провести анализ существующих способов и средств снижения объемов аспирируемого воздуха при перегрузке сыпучих материалов;
- разработать конструкцию воздушного рециркуляционного затвора узла перегрузки с применением эффекта Коанда;
- выполнить аналитические исследования рециркуляционного затвора с использованием эффекта Коанда для определения закономерностей формирования воздушных потоков;
- разработать компьютерную модель и определить рациональные конструктивно-режимные параметры рециркуляционного затвора методом численного моделирования;
- изготовить лабораторный стенд, выполнить планирование и натурные эксперименты, установить регрессионные зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от конструктивно-режимных параметров методом многофакторного эксперимента;
- доработать алгоритм расчёта и подбора конструктивно-режимных параметров рециркуляционного затвора с эффектом Коанда;
- осуществить апробацию предложенной конструкции воздушно-рециркуляционного затвора в промышленных условиях.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- научно обоснована и подтверждена возможность применения эффекта Коанда в узлах подачи рециркуляционного воздуха перегрузочных желобов с целью создания дополнительного аэродинамического сопротивления движению эжектируемого воздушного потока перегружаемым материалом для снижения объема аспирируемого воздуха;
- установлены количественные закономерности влияния относительного объема рециркуляционного воздуха на аэродинамическое сопротивление узла перегрузки сыпучих материалов оборудованного затвором с эффектом Коанда;
- получена экспериментальная зависимость для вычисления аэродинамического сопротивления воздушно-рециркуляционного затвора;

- получены уравнения регрессии, позволяющие определить рациональное соотношение конструктивно-режимных параметров рециркуляционного затвора.

Теоретическая значимость работы состоит в установлении закономерностей формирования аэродинамического сопротивления перегрузочного жёлоба при подаче рециркуляционного воздуха с эффектом Коанда и в развитии методики расчёта объёмов эжектируемого и аспирируемого воздуха для систем аспирации с рециркуляцией.

Практическая значимость работы заключается в создании узла подачи рециркуляционного воздуха, работающего с дополнительным эффектом Коанда; в доработанном алгоритме расчета КМС и объемов эжектируемого воздуха $Q_{ж}$ в желобах с рециркуляцией и затвором предложенной конструкции, защищенного патентом РФ № 217464 на полезную модель. Данная конструкция рассмотрена на техническом совете и принята к реализации в промышленных условиях АО «Комбинат КМАруда» (г. Губкин, Белгородская область). Алгоритм расчета (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024680776) используется при проектировании аспирационных систем ООО «ЦЕНТРОГИПРОРУДА» (г. Белгород, проектная организация).

Методология и методы исследования основаны на положениях динамической теории эжекции, газовой динамики, методах вычислительной гидродинамики (CFD-моделирования), планирования многофакторного эксперимента и математической статистики. Экспериментальные исследования выполнены на разработанной автором лабораторной установке с использованием поверенных средств измерений.

На защиту выносятся следующие научные положения и результаты:

- результаты экспериментальных исследований аспирационной системы с принудительной рециркуляцией, способствующей снижению энергоёмкости системы аспирации в укрытиях при перегрузке сыпучих материалов;
- экспериментальная зависимость для вычисления аэродинамического сопротивления воздушно-рециркуляционного затвора;
- алгоритм расчёта КМС и объёмов эжектируемого воздуха $Q_{ж}$ в желобах с рециркуляцией и затвором предложенной конструкции;
- уравнения регрессии, позволяющие определить рациональное соотношение конструктивно-режимных параметров рециркуляционного затвора;
- новая конструкция узла подачи рециркуляционного воздуха, работающего с дополнительным эффектом Коанда, защищённая патентом РФ на полезную модель, осуществляющая эффективное снижение объёмов эжектируемого воздуха.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций обоснована использованием фундаментальных законов газовой динамики, апробированных методов вычислительной гидродинамики и математической статистики, поверенных средств измерений и удовлетворительной сходимостью результатов аналитических, численных и натурных исследований.

Апробация результатов работы. Основные результаты доложены на научно-практических конференциях: «Наукоёмкие технологии и инновации» (Белгород, 2023); Всероссийской конференции по теплогазоснабжению и вентиляции, посвящённой 70-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2024); Международной научно-технической конференции молодых учёных БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2025); «Инновационные научные исследования в современном мире» (Уфа, 2025), III Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные экологические проблемы современных городов» (Иваново, 2026). Результаты работы докладывались на технических советах в АО «Комбинат КМАруда» и в ООО «ЦентроГИПРОруда».

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 10 научных публикациях, из которых 2 - в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК РФ. По результатам работы получены патент Российской Федерации на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, разработке конструкции воздушно-рециркуляционного затвора с эффектом Коанда, создании компьютерной и физической моделей, планировании и проведении численных и натурных экспериментов, обработке и анализе полученных данных, разработке инженерного алгоритма расчёта и участии в промышленной апробации.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 153 наименований и 5 приложений. Работа изложена на 180 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок и 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, представлены сведения о реализации и апробации результатов.

Глава 1. Посвящена анализу способов и средств локализации пылевыделений при перегрузке сыпучих материалов и обоснованию направлений совершенствования систем аспирации. Выполнен обзор существующих конструкций аспирационных укрытий и узлов подачи воздуха и методов расчёта систем аспирации.

Установлено, что перспективным, но недостаточно изученным направлением является подача рециркуляционного воздуха непосредственно в перегрузочный жёлоб навстречу эжектируемому потоку с использованием эффекта Коанда - свойства струи прилипать к криволинейной поверхности и следовать вдоль неё. Такой подход позволяет создать дополнительное аэродинамическое сопротивление движению эжектируемого воздуха без применения контактных механических элементов.

По результатам анализа предложена усовершенствованная конструкция воздушно-рециркуляционного затвора с эффектом Коанда, защищённая патентом РФ на полезную модель № 217464 (рисунок 1). Очищенный в циклоне-пылеконцентраторе воздух по обводной трубе возвращается в верхнюю часть перегрузочного жёлоба через криволинейные рециркуляционные каналы, где за счёт эффекта Коанда струи прилипают к поверхности жёлоба и движутся навстречу эжектируемому потоку, создавая дополнительное аэродинамическое сопротивление.

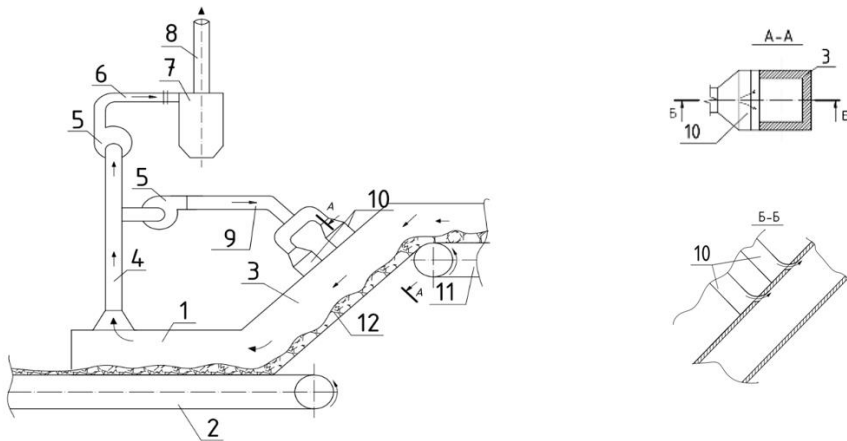


Рисунок 1 – Принципиальная схема аспирационной системы с принудительной рециркуляцией: 1 - нижнее аспирационное укрытие с коробом; 2 - нижний ленточный конвейер; 3 - перегрузочный желоб; 4 - аспирационный воздуховод; 5 - вентиляторы; 6 - напорный патрубок; 7 - циклон; 8 - патрубок отвода очищенного воздуха; 9 - рециркуляционный воздуховод; 10 – распределители воздушно-пылевого потока с рециркуляционными каналами; 11 - верхний ленточный конвейер; 12 - перегружаемый материал

Глава 2. Выполнены аналитические и численные исследования аэродинамических характеристик воздушно-рециркуляционного затвора. Расчётная схема узла с воздушно-рециркуляционными каналами, использованная при численном моделировании, приведена на рисунке 2.

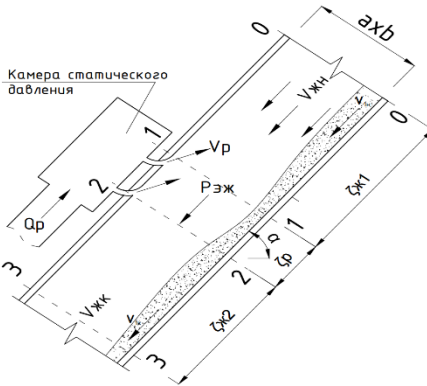


Рисунок 2 – Схема аспирационного тракта перегрузочного желоба с воздушно-рециркуляционным затвором: 0–1 - входной участок эжекции; 1–2 - рециркуляционный узел ($\zeta_{уэл}$); 2–3 - выходной участок; $V_{жн}$, $V_{жк}$ - скорости воздуха; V_p - скорость рециркуляции; $P_{эж}$ - эжекционное давление; L_p - длина рециркуляционного канала

В ней рециркуляционные струи, прилипающие к криволинейной поверхности желоба за счёт эффекта Коанда, движутся навстречу эжектируемому потоку и формируют зону повышенного аэродинамического сопротивления, снижающую расход эжектируемого воздуха.

Вклад затвора в сопротивление тракта учитывается коэффициентом местного сопротивления $\zeta_{уэл}$ в составе суммарного коэффициента местных сопротивлений тракта, определяемого по динамическому методу расчёта аспирации И.Н. Логачёва и О.Д. Нейкова:

$$\Sigma\zeta = \zeta_{вх} + \zeta_0 + \zeta_{пер} + \zeta_{уэл} + \lambda l/D, \quad (1)$$

где $\zeta_{вх}$, ζ_0 , $\zeta_{пер}$ - коэффициенты местных сопротивлений входа, укрытия и перегородки; $\zeta_{уэл}$ - коэффициент местного сопротивления воздушно-рециркуляционного затвора; $\lambda l/D$ - потери на трение по длине.

Объём эжектируемого воздуха в области автомательности (число Бутакова–Нейкова $Bi > 3$), характерной для промышленных перегрузочных узлов, определяется по динамическому методу расчёта аспирации И.Н. Логачёва и О.Д. Нейкова:

$$Q_{жс} = F \cdot \sqrt{[2(P_{об} + P_{э})/(\rho \cdot \Sigma\zeta)]}, \quad (2)$$

где F - площадь поперечного сечения желоба, m^2 ; $P_{об}$ - давление, развиваемое рабочими органами аспирируемого оборудования; $P_{э}$ - эжекционное давление, Па; ρ - плотность воздуха, kg/m^3 . Объём $Q_{жс}$ обратно пропорционален $\Sigma\zeta$: установка затвора увеличивает $\Sigma\zeta$ на величину $\zeta_{уэл}$ и снижает $Q_{жс}$, а с ним и объём аспирируемого воздуха $Q_a = Q_{жс} + Q_p + Q_n$.

Аналитическое выражение коэффициента местного сопротивления воздушно-рециркуляционного затвора получено автором из баланса полного давления в тракте:

$$\zeta_p = \Delta P_{0-3}/(\rho V_{жн}^2/2) - \Delta P_{тр} = F_p V_p (2V_{жн} + F_p V_p)/V_{жс}^2, \quad (3)$$

где ΔP_{0-3} — перепад полного давления между входным и выходным сечениями узла, Па; $\Delta P_{тр}$ - потери давления на трение, Па; $F_p = Q_p/Q_{жс}$ - безразмерный относительный расход рециркуляции; V_p - скорость

рециркуляционного потока в канале; $V_{жн}$, $V_{жк}$ - скорость эжектируемого воздуха в начале и конце жёлоба, м/с.

Взаимодействие эжектируемого воздуха и потока материала характеризуется коэффициентом скольжения фаз, определяемым по динамическому методу расчёта аспирации:

$$\phi = v_{жн}/v_k, \quad (4)$$

где $v_{жн}$ - скорость эжектируемого воздуха; v_k — скорость частиц материала в конце жёлоба, м/с.

Величина ϕ определяется с использованием числа Бутакова–Нейкова и критерия Эйлера. Максимум коэффициента местного сопротивления $\zeta_{узл}$ соответствует минимуму объёма эжектируемого воздуха, что положено в основу оптимизации конструктивно-режимных параметров затвора.

Численное моделирование выполнено в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulation путём решения осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых k - ϵ моделью турбулентности; решалась внутренняя газодинамическая задача движения воздуха в полости жёлоба на неструктурированной адаптированной сетке. Достоверность модели подтверждена исследованием сеточной сходимости: при последовательном измельчении сетки значение $\zeta_{узл}$ стабилизируется, и дальнейшее увеличение числа ячеек изменяет результат менее чем на 1 %.

Исследовано влияние геометрических параметров рециркуляционных каналов — отношения радиусов кривизны R_1/R_2 и отношения высоты к ширине канала h/b — на сопротивление узла. Установлено, что радиус кривизны определяет устойчивость коандовского прилипания струи: при малых значениях R_1/R_2 струя отрывается от стенки и эффект подпора ослабевает, при чрезмерно больших — снижается кривизна траектории и уменьшается противоток. Определяющим фактором является безразмерное отношение скоростей. Моделирование режима с нулевой начальной скоростью эжектируемого воздуха ($V_{жн} = 0$) показало формирование в жёлобе налипания струи на стенки желоба, что является прямым подтверждением реализации эффекта Коанда в предложенной конструкции.

Глава 3. Посвящена описанию оборудования, плана, программы и методики экспериментальных исследований. Для проверки результатов численного моделирования в натурных условиях разработан и изготовлен лабораторный стенд (рисунок 3).

Для получения квадратичной регрессионной модели эксперимент выполнен по центральному композиционному факторно-центрованному плану (ЦКП-ГК), включающему 15 опытов при уровне значимости 0,05.

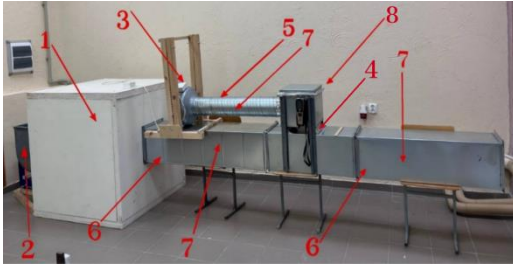


Рисунок 3 –Общий вид экспериментального стенда: 1 - камера статического давления; 2 - центробежный вентилятор ВР-8677М-3,15ОН с частотным преобразователем; 3 - центробежный вентилятор канального типа СК160 с частотным преобразователем; 4 - рециркуляционные каналы; 5 - воздуховод оцинкованный Ø160 мм; 6 - прямоугольный воздуховод, выступающий в роли перегрузочного желоба сечением 300х300 мм с возможностью регулирования угла наклона; 7 – отверстия для снятия показаний; 8 - камера статического давления для подачи рециркуляционного воздуха в каналы 4.

Глава 4. Представлены результаты натурного эксперимента и построены регрессионные модели коэффициента местного сопротивления затвора. Первоначально Модель (5) строилась на отдельных скоростных факторах — числе рядов каналов Z , скорости рециркуляционного V_p и начальной скорости эжектируемого $V_{жн}$ воздуха; по результатам обработки получено уравнение регрессии:

$$\zeta_{уэл} = 1,0001 + 2,5701 \cdot Z - 0,37444 \cdot Z^2 + 0,32646 \cdot V_p + 0,026597 \cdot V_p^2 - 2,1523 \cdot V_{жн} + 0,58914 \cdot V_{жн}^2 + 0,46563 \cdot Z \cdot V_p - 0,975 \cdot Z \cdot V_{жн} - 0,23125 \cdot V_p \cdot V_{жн}. \quad (5)$$

Несмотря на формальную значимость регрессии по критерию Фишера, ни один из частных коэффициентов Модели (5) не оказался значимым при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (коэффициент детерминации $R^2 = 0,8697$), что является характерным признаком взаимной корреляции факторов: отдельные скорости V_p и $V_{жн}$ физически связаны через соотношение динамических давлений, поэтому их линейные и квадратичные эффекты неразделимы. Вследствие этого Модель (5) не позволяет достоверно оценить влияние отдельных факторов и не может быть использована для физического анализа процесса, что потребовало перехода к безразмерному скоростному комплексу $V_p/V_{жн}$.

Переход к безразмерному отношению $V_p/V_{жн}$ позволил получить адекватное уравнение регрессии:

$$\zeta_{уэл} = 1,0377 - 0,6279 \cdot Z - 0,3056 \cdot Z^2 - 0,9931 \cdot (V_p/V_{жн}) + 0,1335 \cdot (V_p/V_{жн})^2 + 1,1562 \cdot Z \cdot (V_p/V_{жн}). \quad (6)$$

Модель (6) адекватна: $R^2 = 0,977$, критерий Фишера $F = 76,2$ значительно превышает критическое значение, $p < 0,0001$. Физический смысл безразмерного комплекса состоит в том, что взаимодействие

рециркуляционной струи с эжекционным потоком определяется соотношением их динамических давлений, пропорциональным квадрату отношения скоростей; доминирующим является член взаимодействия $Z \cdot (V_p/V_{жн})$, что указывает на синергетический характер совместного влияния факторов.

Рациональные конструктивно-режимные параметры затвора определены методом обобщённой функции желательности Харрингтона. Профили предсказанных значений и обобщённой функции желательности для Модели 2 приведены на рисунке 4: профили имеют узкие доверительные интервалы, а обобщённая функция желательности достигает чётко выраженного максимума, что позволяет достоверно определить рациональное сочетание факторов Z и $V_p/V_{жн}$.

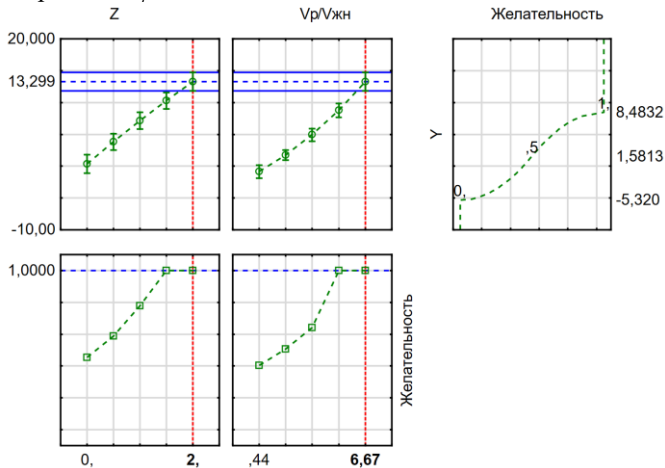


Рисунок 4 – Профили предсказанных значений и функции желательности Харрингтона для Модели 2

Зависимости коэффициента местного сопротивления $\zeta_{уэл} = f(V_p/V_{жн})$ при числе рядов рециркуляционных каналов $Z = 0, 1$ и 2 шт. приведены на рисунке 5. Графики детально отражают взаимосвязь коэффициента сопротивления со скоростным комплексом: при $Z = 0$ сопротивление минимально и слабо зависит от отношения скоростей, тогда как при $Z = 1$ и особенно $Z = 2$ оно закономерно и существенно возрастает с ростом $V_p/V_{жн}$. Это подтверждает определяющую роль безразмерного комплекса $V_p/V_{жн}$ и синергетический характер совместного влияния факторов. Максимум обобщённой функции желательности соответствует рациональным параметрам $Z = 2$ и $V_p/V_{жн} = 6,67$, при которых коэффициент местного сопротивления достигает максимального значения $\zeta_{уэл} = 13,5$; при этом затвор превосходит по коэффициенту местного сопротивления укрытие с жёсткой перегородкой на 13–69 % и в 5–9 раз - укрытия с одинарными стенками.

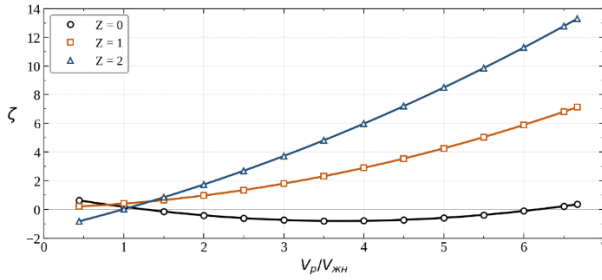


Рисунок 5 – Зависимость $\zeta_{y3l} = f(V_p/V_{жн})$ для $Z = 0, 1$ и 2 шт.

Раздельное влияние скоростей иллюстрируют зависимости $\zeta_{y3l} = f(V_p)$ при $V_{жн} = \text{const}$ и $\zeta_{y3l} = f(V_{жн})$ при $V_p = \text{const}$ (рисунок 6): рост скорости рециркуляционного потока и снижение начальной скорости эжектируемого воздуха повышают коэффициент местного сопротивления затвора.

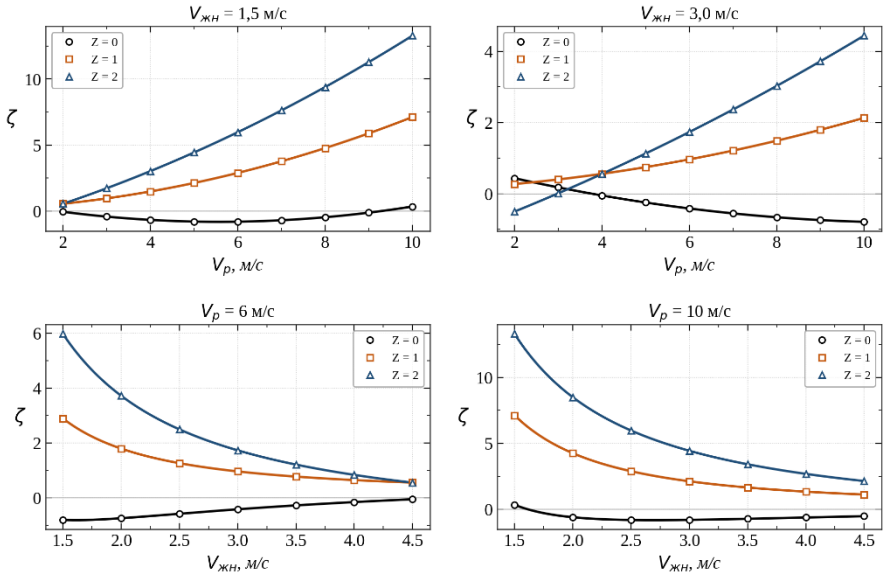


Рисунок 6 – Зависимости $\zeta_{y3l} = f(V_p)$ и $\zeta_{y3l} = f(V_{жн})$

Достоверность экспериментальных данных подтверждена сопоставлением с результатами численного моделирования: корреляционная зависимость $\zeta_{CFD} = f(\zeta_{nam})$ характеризуется коэффициентом корреляции $r = 0,9935$, коэффициентом детерминации $R^2 = 0,987$ и среднеквадратической ошибкой $RMSE = 0,96$, что подтверждает адекватность численной модели и согласованность двух независимых методов исследования.

Глава 5. Выполнены промышленная апробация предложенного решения и оценка его технико-экономической и экологической эффективности. Объектом намерения внедрения служат четыре перегрузочных узла, различающихся конструкцией аспирационного укрытия и перегружаемым материалом (кварцевый песок и кусковая железная руда). Разработан инженерный алгоритм расчёта аспирационной системы с воздушно-рециркуляционным затвором, представляющий собой последовательность из 16 этапов в двух функциональных блоках: первый блок реализует аэродинамический расчёт (определение объёмов эжектируемого и аспирируемого воздуха и суммарного сопротивления тракта), второй — подбор оборудования и оценку эффективности. Принципиальное отличие алгоритма от известных методик состоит в учёте коэффициента $\zeta_{\text{уэл}}$, определяемого по полученному уравнению регрессии.

Объём удаляемого в атмосферу воздуха связан с аспирируемым и рециркулируемым расходами соотношением:

$$Q_в = Q_a - Q_p, \quad (7)$$

где $Q_в$ - объём удаляемого воздуха; Q_a - объём аспирируемого воздуха; Q_p - расход рециркулируемого воздуха, м³/ч.

Сравнительный анализ по четырём узлам показал, что установка затвора обеспечивает снижение объёма удаляемого в атмосферу воздуха $Q_в$ на 18–58 %, аспирируемого воздуха Q_a — на 5–33 %, эжектируемого $Q_{\text{жс}}$ — на 8–63 % в зависимости от конструктивного исполнения укрытия и доли рециркулируемого воздуха.

Расчетная годовая экономия эксплуатационных затрат действующего аспирационного укрытия при модернизации одного узла предложенной конструкции составляет 94,6 тыс. руб., срок окупаемости 0,93 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования.

1. На основании проведённого анализа способов и оборудования для локализации источников пылевыведения при перегрузке сыпучих материалов установлено, что существующие технические решения не исчерпывают возможности оптимизации аэродинамических процессов в перегрузочных узлах за счёт использования рециркуляции воздуха. Предложено запатентованное конструктивно-техническое решение воздушно-рециркуляционного затвора для мест перегрузки сыпучих материалов с использованием эффекта Коанда.

2. На основе системы дифференциальных уравнений (Логачёва И.Н.) получена расчётная зависимость объёма эжектируемого воздуха $Q_{\text{жс}}$. Доказано, что использование воздушно-рециркуляционного затвора с эффектом Коанда увеличивает $\Sigma\zeta$ на величину $\zeta_{\text{уэл}}$ и обеспечивает снижение $Q_{\text{жс}}$ обратно пропорциональное квадратному корню из суммы коэффициентов

местного сопротивления. Численным моделированием в среде SOLIDWORKS FloWorks установлено, что расчётные рациональные конструктивно-режимные параметры составляют $R_1/R_2 = 0,695$, $V_p/V_{жс} = 16,96$, $h/b = 1,42$; определяющим фактором является безразмерное отношение скоростей $V_p/V_{жс}$, рост которого монотонно увеличивает $\zeta_{узл}$.

3. Разработан, спроектирован и изготовлен лабораторный стенд; подобраны оборудование и контрольно-измерительные приборы; выбран и обоснован план многофакторного эксперимента, определены функции отклика, исследуемые факторы и уровни их варьирования.

4. По результатам натурного эксперимента, выполненного в соответствии с планом ЦКП-ГК, установлено, что одним из наиболее значимых факторов, влияющих на аэродинамическое сопротивление узла, является безразмерное отношение $V_p/V_{жсн}$. Подтверждено, что рост $\zeta_{узл}$ означает увеличение гидравлического сопротивления узла «затвор - желоб», что снижает объёмный расход эжектируемого воздуха $Q_{эж}$ при неизменных прочих параметрах тракта. Снижение $Q_{эж}$ напрямую уменьшает объём аспирируемого воздуха $Q_{асп} = Q_{эж} + Q_n$, что позволяет уменьшить установленную мощность вентиляционного агрегата и нагрузку на пылеуловитель.

5. Экспериментально полученное уравнение регрессии подтвердило, что рост $\zeta_{узл}$ означает увеличение гидравлического сопротивления узла «затвор — жёлоб», что снижает объёмный расход эжектируемого воздуха $Q_{эж}$. Снижение $Q_{эж}$ напрямую уменьшает объём аспирируемого воздуха $Q_{асп} = Q_{эж} + Q_n$ и позволяет уменьшить установленную мощность вентиляционного агрегата и нагрузку на пылеуловитель.

6. На основании экспериментально полученного уравнения регрессии методом оптимизации на основе функции желательности Харрингтона определены рациональные параметры: $Z = 2$ шт., ($V_p/V_{жсн} = 6,67$). Воздушно-рециркуляционный затвор с эффектом Коанда, при указанных рациональных параметрах, обеспечивает КМС разработанного узла $\zeta_{узл} = 13,5$, что превышает показатели стандартных аспирационных укрытий без воздушно-рециркуляционного затвора. Таким образом, предложенная конструкция затвора обладает высокой эффективностью за счет снижения объёмов аспирируемого воздуха и может быть рекомендована к промышленному использованию.

7. Доработан инженерный алгоритм расчёта аспирационной системы с воздушно-рециркуляционным затвором, отличающийся от ранее известных методик (по работам И. Н. Логачёва, О. Д. Нейкова, В. А. Минко и др.) учётом коэффициента местного сопротивления узла $\zeta_{узл}$ по полученному в главе 4 регрессионному уравнению.

Предложенные аналитические зависимости, конструктивные решения и рекомендации по рациональным конструктивно-режимным параметрам могут быть **рекомендованы** при расчете и проектировании узла подачи рециркуляционного воздуха систем аспирации

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в развитии методов моделирования пылевоздушных потоков в системах аспирации с рециркуляцией, в распространении предложенного решения на перегрузочные узлы предприятий других отраслей и в исследовании многоступенчатой рециркуляции с эффектом Коанда.

**СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ,
В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ
В журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий,
рекомендуемых ВАК РФ**

1. **Киреев, В. Е.** Аэродинамические аспекты совершенствования аспирации с рециркуляционным затвором / В. Е. Киреев, В. А. Уваров, В. М. Киреев, Е. Н. Попов, Л. В. Ткач // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2026. — Т. 11, № 3. — С. 94–103. — DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-94-103.

2. **Ткач, Л. В.** Численное (CFD) моделирование абразивного износа при регулировании расхода в аспирационных системах / Л. В. Ткач, **В. Е. Киреев** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2026. — Т. 11, № 7. — С. 71–80. — DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-71-80.

В сборниках трудов конференций

3. **Киреев, В. М.** К возможности использования общеобменной приточной системы вентиляции в качестве воздушной завесы / В. М. Киреев, В. А. Минко, А. С. Гринченко, **В. Е. Киреев** // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. — 2021. — № 2 (17). — С. 17–24.

4. **Киреев, В. Е.** Разработка энергосберегающих технологий обеспыливания технологических процессов производства / В. Е. Киреев // Научоёмкие технологии и инновации : сб. докл. конф. — Белгород, 2023. — С. 35–39.

5. **Киреев, В. Е.** К вопросу использования эффекта Коанда в рециркуляционных системах аспирации / В. Е. Киреев // Сборник докладов Всероссийской конференции по теплогазоснабжению и вентиляции, посвящённой 70-летию со дня образования БГТУ им. В. Г. Шухова. — Белгород, 2024. — С. 29–35.

6. **Киреев, В. Е.** Классификация воздушных затворов и применение их в рециркуляционных системах / В. Е. Киреев, И. Д. Гольцов // Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых учёных БГТУ им. В. Г. Шухова. — Белгород, 2025. — С. 36–40.

7. **Киреев, В. Е.** Основные направления повышения эффективности обеспыливающих систем / В. Е. Киреев // Инновационные научные исследования в современном мире: теория, методология, практика : сб. статей. — Уфа, 2025. — С. 38–43.

8. **Киреев, В. Е.** Анализ способов локализации пыли в аспирационных укрытиях перегрузочных узлов ленточных конвейеров и обоснование

воздушно-рециркуляционного затвора с эффектом Коанда / В. Е. Киреев // Материалы Международной научно-технической конференции молодых учёных БГТУ им. В. Г. Шухова (Белгород, 28–29 мая 2026 г.). — Белгород : Изд-во БГТУ, 2026.

Объекты интеллектуальной собственности

9. Патент № 217464 Российская Федерация, МПК E21F 5/00. Узел перегрузки с рециркуляцией аспирируемого воздуха : № 2022130751 : заявл. 25.11.2022 : опубл. 03.04.2023, Бюл. № 11 / Киреев В. М., Гольцов А. Б., Овсянников Ю. Г., Семененко А. С., Логачёв К. И., Аверкова О. А., **Киреев В. Е.**, Гольцов И. Д.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024680776 / **В. Е. Киреев**, А. Б. Гольцов, В. М. Киреев, Н. Ю. Саввин ; ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова. — Зарегистрировано 03.09.2024.

КИРЕЕВ ВЛАДИМИР ЕВГЕНЬЕВИЧ

**РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ ЗАТВОР С ЭФФЕКТОМ КОАНДА ДЛЯ
АСПИРАЦИОННЫХ УКРЫТИЙ МЕСТНОЙ ВЫТЯЖНОЙ
ВЕНТИЛЯЦИИ**

Специальность 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 09.10.2026 г.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ №119

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова. 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46