

На правах рукописи



КРЮКОВ ИЛЬЯ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ
ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ
ЗА СЧЕТ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ**

**05.23.03 - Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Аверкова Ольга Александровна

Официальные оппоненты: **Боровков Дмитрий Павлович**
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический университет»
кафедра безопасности жизнедеятельности в
строительстве и городском хозяйстве,
профессор, г. Волгоград

Зиганшин Арслан Маликович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
кафедра теплоэнергетики, газоснабжения и
вентиляции, доцент, г. Казань

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»,
г. Ростов-на-Дону

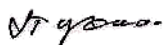
Защита диссертации состоится 27 июня 2017 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2017г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Виктор Алексеевич Пухкал

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. Перегрузки сыпучих материалов в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства сопровождаются значительными пылевыделениями. Наиболее надёжным способом улавливания пылевых образований при перегрузке сыпучих материалов является применение местной вытяжной вентиляции. Местные вентиляционные отсосы закрытого типа – аспирационные укрытия исключают попадание загрязняющих веществ, в частности пыли, в производственные помещения и снижают загрязнение окружающей среды. При высокой степени эффективности аспирационных укрытий остро стоит задача снижения их энергоёмкости. Существующие способы решения данной задачи разделяются на два направления: снижение расхода воздуха, поступающего через неплотности и снижение объёма воздуха, эжектируемого потоком сыпучего материала. Минимизацию объёма эжектируемого воздуха осуществляют путём снижения скорости падения потока сыпучего материала; увеличения аэродинамического сопротивления при движении эжектируемого воздуха; организации циркуляции воздушной среды – рециркуляции. Рециркуляция за счет потерь энергии при движении воздушной среды по обводным (байпасным) каналам существенно снижает расход эжектируемого воздуха, поступающего в аспирационное укрытие и, как следствие, позволяет снизить расход воздуха, удаляемого из укрытия. Таким образом, теоретическое и экспериментальное исследование явления рециркуляции и способов ее организации, является актуальной задачей, направленной на разработку эффективных систем обеспыливающей вентиляции сниженной энергоёмкости.

Данное направление исследований поддержано грантами, по которым оно разрабатывалось: Президента РФ НШ–588.2012.8 «Разработка методов пыле- и газопылеулавливания в пыльных цехах промышленных предприятий» (2012 - 2013); РФФИ № 12-08-97500-р_центр_а «Разработка методов и алгоритмов компьютерного моделирования, численное и экспериментальное исследование отрывных течений в энергосберегающих системах улавливания загрязняющих веществ» (2012 - 2014); программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова по проекту № А-10/12 «Разработка энергосберегающих систем локализации пылегазовых выделений при производстве строительных материалов» (2012 - 2015); Президента РФ МК-103.2014.1 «Разработка методов и алгоритмов математического моделирования, численное и экспериментальное исследование двухфазных потоков в системах аспирации» (2014 - 2015); РФФИ № 14-41-08005 р_офи_м «Математическое моделирование процессов аспирации и разработка научных основ создания энергоэффективных систем локализации пылегазовых выделений» (2014-2016).

Степень разработанности темы исследования. Проблемам обеспыливающей вентиляции и их совершенствованию, численному и

аналитическому исследованию вентиляционных течений посвящены труды Азарова В.Н., Беспалова В.И., Богуславского Е.И., Боровкова Д.П., Бутакова С.Е., Вальдберга А.Ю., Голованчикова А.Б., Гольшева А.М., Гримитлина А.М., Гримитлина М.И., Дацюк Т.А., Журавлева В.П., Зиганшина А.М., Зиганшина М.Г., Красовицкого Ю.В., Ливчак И.Ф., Логачева И.Н., Нейкова О.Д., Мензелинцевой Н.В., Минко В.А., Панова С.Ю., Позина Г.М., Посохина В.Н., Страховой Н.А., Талиева В.Н., Таурит В.Р., Уляшевой В.М., Хоперскова А.В., Шапталы В.В., Шапталы В.Г., Шепелева И.А., Штокмана Е.А., А.А., Anderson D.M., Nath T., Nemeon W.C.L., Jones M.G., Bianconi W.O.A., Wyruch P.W., Xiaochuan Li и многих других.

В частности, разработкой систем рециркуляции для снижения расхода эжектируемого воздуха посвящены труды Аверковой О.А., Гольшева А.М., Логачева И.Н., Минко В.А., Овсянникова Ю.Г. Было рассмотрено явление рециркуляции воздушных течений за счет устройства обводных каналов и за счет использования перфорированного загрузочного канала. Исследования комбинированной рециркуляции воздушных течений за счет перетекания воздуха из загрузочного канала в байпасную камеру и обратно через перфорационные отверстия загрузочной трубы и её торцы не производилось, ни теоретически, ни экспериментально.

Цель исследования заключается в теоретическом и экспериментальном выявлении закономерностей рециркуляционного воздушного потока, организованного в системе «загрузочный канал – байпасная камера», аэродинамически связанных торцевыми открытыми проёмами и перфорационными отверстиями загрузочного канала, способствующих повышению эффективности систем вентиляции при перегрузках сыпучих материалов.

Задачи исследования:

- на основе дифференциальных уравнений эжектируемого воздуха в вертикальной перфорированной трубе, при перемещении в ней потока сыпучего материала, и рециркулируемого воздушного потока в байпасной камере, разработать математическую модель комбинированной рециркуляции воздушных течений через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры;

- определить параметры, обеспечивающие снижение объёмов эжекции за счет организации рециркуляционных течений воздуха;

- экспериментально выявить влияние рециркуляции на расход воздуха, необходимого для удаления из аспирационного укрытия; определить оптимальное отношение диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочного канала; найти влияние перфорационных отверстий загрузочного канала, места их нанесения, на снижение необходимого объёма аспирации; оценить эффект комбинированно организованной рециркуляции на объем эжектируемого воздуха;

– разработать методику расчёта расходов эжектируемого, рециркулируемого и аспирируемого воздушных потоков при локализации пылевых выбросов при перегрузке сыпучего материала;

– разработать конструкции аспирационных укрытий сниженной энергоёмкости, эффективно локализирующих пылевыведения при перегрузках сыпучих материалов.

Объект исследования – местное вентиляционное устройство закрытого типа при обеспыливании процесса перегрузки сыпучего материала.

Предмет исследования – процессы рециркуляции воздушных потоков при комбинированном байпасировании.

Научная новизна исследования состоит в следующем.

1. Разработана математическая модель комбинированной рециркуляции воздушных течений через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры, на основе дифференциальных уравнений эжектируемого воздуха в вертикальной перфорированной трубе, при перемещении в ней потока сыпучего материала, и рециркулируемого воздушного потока в байпасной камере.

2. В результате численных расчетов доказано, что расход эжектируемого воздуха существенно снижается за счет организации рециркуляционных воздушных течений.

3. Экспериментальным путём выявлено, что при снабжении загрузочного канала аспирационного укрытия байпасной камерой, где перетекание воздуха осуществляется на их торцах, возникает рециркуляция воздуха, способствующая снижению расхода эжектируемого воздуха. Оптимальным отношением диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы является величина равная 2-2,5.

4. Выявлено, что перфорирование загрузочной трубы при комбинированном использовании торцевого перетекания и перфорации приводит к снижению расхода аспирируемого воздуха только в случае, когда перфорация находится в области разрежения. Установлено, что использование торцевого перетекания воздуха между байпасной камерой и загрузочным каналом позволяет снизить в системе вентиляции расход аспирируемого воздуха до 69%, а при комбинированном использовании торцевого перетекания и перфорации - до 84%.

5. Разработана методика расчета расходов эжектируемого, рециркулируемого и аспирируемого воздушных потоков при перегрузке сыпучего материала на телескопических станциях.

Методологической основой работы является динамическая теория эжекции воздуха потоком сыпучего материала. В ходе диссертационного исследования использовались вычислительный и натурный эксперимент; методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, метод граничных интегральных уравнений.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,

газоснабжение и освещение», а именно п.1 «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии», п.3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума».

Теоретическая значимость работы состоит в разработке математической модели динамики эжектируемого и рециркулируемого воздушных потоков в вертикальной перфорированной трубе, при перемещении в ней потока сыпучего материала и комбинированной рециркуляции воздуха через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в:

– разработке способа снижения производительности местных вентиляционных отсосов закрытого типа, необходимой для эффективного улавливания выбросов загрязняющих веществ;

– разработке конструкции аспирационных укрытий перегрузок сыпучих материалов;

– разработке инженерной методики расчёта необходимого расхода аспирируемого воздуха при перегрузке сыпучего материала на телескопических станциях.

Результаты исследования нашли применение при проектировании и модернизации систем вентиляции в ООО «Брянская мясная компания» (производство комбикормов); в ООО "Институт «БелАгроПроект+» и в учебном процессе магистрантов по направлению «Строительство» в БГТУ им. В.Г. Шухова.

Положения, выносимые на защиту:

– математическая модель комбинированной рециркуляции воздушных течений через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры;

– результаты численных расчетов, доказывающих снижение расхода эжектируемого воздуха за счет организации рециркуляционных воздушных течений;

– результаты натурных экспериментов по выявлению влияния рециркуляции воздушных потоков, организованных путём организации торцевого перетекания между загрузочным каналом и байпасной камерой на снижение расхода эжектируемого воздуха, а также по определению оптимального отношения диаметров байпасного и загрузочного каналов;

– выявленные путём проведения натурального эксперимента закономерности снижения расходов эжектируемого и аспирируемого воздуха за счет комбинированного байпасирования – организации рециркуляции воздушных течений за счет перетекания воздуха через торцы байпасного канала и отверстий перфорации его боковой поверхности;

– методика расчета расходов эжектируемого, рециркулируемого и аспирируемого воздушных потоков при перегрузке сыпучего материала на телескопических станциях.

Достоверность результатов. Степень достоверности результатов обоснована использованием фундаментальных методов аэродинамики и математики, подтверждается удовлетворительным согласованием результатов аналитических, численных расчетов и результатов натуральных экспериментов.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались на Региональной научно-технической конференции по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области (г. Белгород, 2015, 2016 гг.), Международной научно-практической конференции: «Современные концепции научных исследований» (г. Москва, 2014 г.), Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (г. Екатеринбург, 2016 г.), научно-методических семинарах кафедр «Теплогазоснабжение и вентиляции» СПбГАСУ и БГТУ им. В.Г. Шухова.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 научных работ, из которых 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 2 статьи проиндексированы в WoS и Scopus, 2 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 163 страницы, в том числе 50 рисунков, 11 таблиц, список используемой литературы из 131 наименований и 2 приложения.

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, формулируются цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, апробация проведенных исследований, сведения о публикациях.

В первой главе приведён аналитический обзор средств и способов локализации мест пылеобразования с помощью систем аспирации при перегрузках сыпучих материалов.

Во второй главе разработана математическая модель комбинированной рециркуляции воздушных течений через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры; выявлены закономерности изменения: расходов эжектируемого и рециркулируемого воздушных потоков в зависимости от способа организации рециркуляции и параметра эжекции; скорости воздуха по длине загрузочной трубы; статических давлений в верхнем и нижнем укрытиях, на концах загрузочной трубы от параметра

эжекции. Показано, что расход эжектируемого воздуха существенно снижается за счет организации рециркуляционных воздушных течений.

В третьей главе изложены результаты натурального эксперимента по исследованию рециркуляции воздуха, в соосно расположенных круглой загрузочной трубе и круглой байпасной камере. Выявлено влияние перетекания воздуха через торцы байпасного канала и отверстия перфорации на боковой поверхности загрузочной трубы на расход аспирируемого воздуха. Сопоставлены результаты натурального эксперимента с численными расчётами.

В четвертой главе разработаны: инженерная методика расчёта объёмов аспирируемого воздуха при перегрузках сухих ненагретых материалов с естественной циркуляцией; рекомендации по проектированию местных вентиляционных отсосов закрытого типа сниженной энергоёмкости; методика расчёта расхода эжектируемого воздуха в телескопических погрузчиках.

В заключении подводятся итог выполненных исследований, излагаются выводы и перспективы дальнейшей разработки темы.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработана математическая модель комбинированной рециркуляции воздушных течений через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры, на основе дифференциальных уравнений эжектируемого воздуха в вертикальной перфорированной трубе, при перемещении в ней потока сыпучего материала, и рециркулируемого воздушного потока в байпасной камере.

Движение воздуха в перегрузочной трубе (рисунок 1) осуществляется за счет увлечения воздуха потоком падающего сыпучего материала и разрежения в нижнем укрытии, возникающего вследствие работы вентилятора аспирационной системы. Рециркуляция воздуха осуществляется через отверстия перфорации, равномерно нанесённых на стенки трубы, и через торцевые каналы на концах байпасной камеры (комбинированное байпасирование). Воздух поступает из полости нижнего укрытия в байпасную камеру и выходит в верхнее не аспирируемое укрытие. Разрежение в этом укрытии снижается и уменьшается расход транзитного воздуха Q_1 .

Безразмерное уравнение динамики рециркулируемого в байпасной камере воздуха имеет вид:

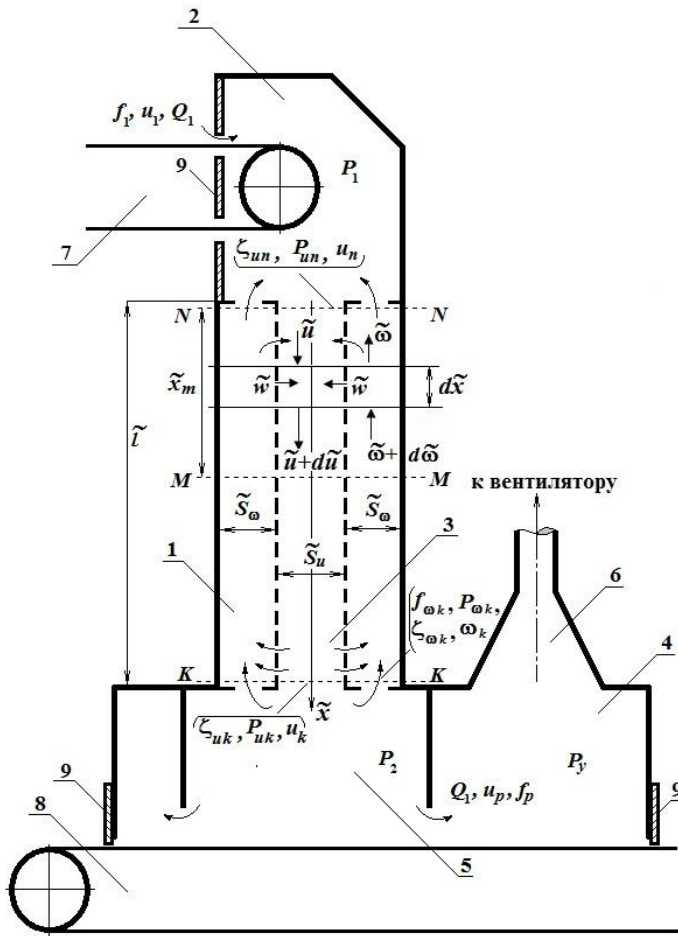
$$dp_{\omega} + 4\omega d\omega = 0; \quad p_{\omega} = 2\tilde{p}_{\omega} / (\tilde{\rho}\tilde{v}_k^2); \quad \omega = \tilde{\omega} / \tilde{v}_k. \quad (1)$$

Уравнение движения воздуха в перфорированной трубе:

$$dp + 4udu = Ke(v - u)|v - u| / v \cdot dx, \quad Ke = 1.5\psi\beta_k \tilde{l} / \tilde{d}_e, \quad (2)$$

где знаком «~» обозначены размерные величины; $p = 2\tilde{p} / (\tilde{\rho}\tilde{v}_k^2)$ - избыточное статическое давление в трубе, Па; \tilde{p}_{ω} - избыточное статическое давление в

байпасной камере; β_k - объёмная концентрация частиц сыпучего материала в конце трубы; \tilde{d}_e - диаметр шара, равный по объёму частице (эквивалентный



диаметр), м; \tilde{v}_k - скорость падения частиц в конце трубы, м; ω - скорость воздушного потока в байпасной камере; $u = \tilde{u} / \tilde{v}_k$ - скорость воздушного потока в загрузочном жёлобе; $v = \tilde{v} / \tilde{v}_k$ - скорость частиц; \tilde{l} - длина жёлоба, м; $x = \tilde{x} / \tilde{l}$ - расстояние от начала жёлоба; ψ - коэффициент аэродинамического сопротивления одной частицы; $\tilde{\rho}$ - плотность воздуха, кг/м³.

Рисунок 1 - Схема рециркуляции воздуха при комбинированном байпасировании: 1 - байпасная камера; 2 - верхнее укрытие; 3 - труба с перфорированной боковой поверхностью; 4 - нижнее укрытие с камерой 5 для приёма перегружаемого материала; 6 - вытяжной патрубок; 7 - верхний конвейер; 8 - нижний конвейер; 9 - уплотнительные фартуки

Краевые условия для скорости воздуха имеют следующий вид.

В начальном сечении $N-N$ (при $x = 0$):

$$u(0) = u_n; \quad \omega(0) = \omega_n; \quad (3)$$

$$w(0) = \frac{u'(0)}{E\sqrt{\zeta_0}} = \gamma_w(0) \sqrt{\frac{|p_\omega(0) - p_u(0)|}{\zeta_0}}; \quad \gamma_w(0) = \text{signum}(p_\omega(0) - p_u(0)); \quad (4)$$

в конечном сечении $K-K$ (при $x = 1$):

$$u(1) = u_k; \quad \omega(1) = \omega_k; \quad (5)$$

$$w(1) = \frac{u'(1)}{E\sqrt{\zeta_0}} = \gamma_w(1) \sqrt{\frac{|p_\omega(1) - p_u(1)|}{\zeta_0}}; \quad \gamma_w(1) = \text{signum}(p_\omega(1) - p_u(1)). \quad (6)$$

Здесь использованы следующие обозначения: $w = \tilde{w} / \tilde{v}_k$ - безразмерная скорость перетекания воздуха через отверстия перфорации; $E = \tilde{S}_0 / (\tilde{S}_u \zeta_0)$ - безразмерный параметр, характеризует степень перфорации, а также к.м.с. ζ_0 отверстий перфорации ($\zeta_0 = 2.4$); \tilde{S}_0 - площадь всех отверстий перфорации; \tilde{S}_u - площадь сечения жёлоба.

Краевые условия для статических давлений:

в начальном сечении $N-N$:

$$p_u(0) = p_1 - \zeta_{un} u_n^2; \quad p_\omega(0) = p_1 - \zeta_{\omega n} \omega_n^2; \quad (7)$$

в конечном сечении $K-K$:

$$p_u(1) = p_2 - \zeta_{uk} u_k^2; \quad p_\omega(1) = p_2 - \zeta_{\omega k} \omega_k^2, \quad (8)$$

где ζ_{un} , ζ_{uk} - к.м.с. входа воздуха в трубу и выхода из неё; $\zeta_{\omega n}$, $\zeta_{\omega k}$ - к.м.с. выхода потока воздуха из байпасной камеры и входа в неё; p_1, p_2 - избыточные статические давления, соответственно в верхнем и нижнем укрытиях. Величины p_1, p_2 выражаются через к.м.с. неплотностей в верхнем укрытии (ζ_1), перегородки камеры для приёма перегружаемого материала (ζ_p), разрежения в нижнем укрытии (p_y) и параметра z :

$$p_1 = -\zeta_1 \left(\tilde{S}_u / \tilde{f}_1 \right)^2 z^2 = -\zeta_1^* z^2, \quad \zeta_1^* = \zeta_1 \left(\tilde{S}_u / \tilde{f}_1 \right)^2; \quad (9)$$

$$p_2 = p_y + \zeta_p \left(\tilde{S}_u / \tilde{f}_p \right)^2 z^2 = p_y + \zeta_p^* z^2, \quad \zeta_p^* = \zeta_p \left(\tilde{S}_u / \tilde{f}_p \right)^2, \quad (10)$$

где \tilde{f}_1, \tilde{f}_p - площадь неплотностей верхнего и нижнего укрытий, m^2 .

Для упрощения расчетов исходные уравнения (1) и (2) были линеаризованы: $udu \approx \bar{u}du$; $\omega d\omega \approx \bar{\omega}d\omega$. Усреднённая скорость потока частиц определялась из выражения:

$$\bar{v} = b_0 + b_1 / 2 + b_2 / 6, \quad (11)$$

где $b_0 = n$; $b_1 = \sqrt{8(1+n^2)} - 3n - 1$; $b_2 = 4(1+n - \sqrt{2(1+n^2)})$.

Потери давления вычислялись по формуле:

$$p_\omega - p_u = \frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} \frac{du}{dx}, \quad (12)$$

где $|\bar{w}|$ - усреднённая абсолютная величина скорости перетекаемого воздуха в отверстиях.

Для определения неизвестных величин u_n, u_k, z получена следующая система трансцендентных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \zeta_{\omega n} \frac{(u_n - z)^2}{r^2} + \zeta_{un} u_n^2 = \frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 + C a_2 + b_1 - k_2), \\ \zeta_{\omega k} \frac{(u_k - z)^2}{r^2} + \zeta_{uk} u_k^2 = -\frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 e^{a_1} + C a_2 e^{a_2} + b_1 - k_2 + b_2), \\ \zeta_{\omega k} \frac{(u_k - z)^2}{r^2} + \zeta_{\omega n} \frac{(u_n - z)^2}{r^2} = 0, \end{cases} \quad (13)$$

где $z = \tilde{Q}_1 / (\tilde{v}_k \tilde{S}_u)$, $\zeta_n^* = \zeta_1^* + \zeta_p^* = \zeta_1 \left(\tilde{S}_u / \tilde{f}_1 \right)^2 + \zeta_p \left(\tilde{S}_u / \tilde{f}_p \right)^2$, $k_2 = 2b_2 A / B$;
 $k_1 = (2A(b_1 - k_2) - b_2) / B$; $a_1 = A + \sqrt{A^2 + B}$; $a_2 = A - \sqrt{A^2 + B}$;

$$A = 2 \left(\bar{u} - \frac{\bar{u} - z}{r^2} \right) \frac{E}{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}; B = k \frac{Ke \cdot E}{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}; C_1 = (m_2 - m_1 e^{a_2}) / (e^{a_1} - e^{a_2});$$

$$C_2 = (m_1 e^{a_1} - m_2) / (e^{a_1} - e^{a_2}); m_1 = u_n - n + k_1; m_2 = u_k - 1 + k_1 + k_2.$$

Усреднённые скорости перетекания воздуха определялись по формулам:
 $|\bar{w}| \approx (|w(0)| + |w(1)|) / 3,$

$$|w(0)| = \sqrt{\frac{\zeta_{он}}{\zeta_0} \left(\frac{u_n - z}{r} \right)^2 + \frac{\zeta_{ин}}{\zeta_0} u_n^2}; |w(1)| = \sqrt{\frac{\zeta_{ок}}{\zeta_0} \left(\frac{u_k - z}{r} \right)^2 + \frac{\zeta_{ук}}{\zeta_0} u_k^2}.$$

После решения системы (13) и вычисления u_n и u_k , расчётная величина усреднённой скорости эжектируемого воздуха определяется по формуле:

$$\bar{u} = \bar{v} + C_1 (e^{a_1} - 1) / a_1 + C_2 (e^{a_2} - 1) / a_2 - k_1 - 0,5k_2. \quad (14)$$

2. В результате численных расчетов доказано, что расход эжектируемого воздуха существенно снижается за счет организации рециркуляционных воздушных течений.

Результаты исследований на примере узла перегрузки показали, что при комбинированном байпасировании расход рециркулируемого воздушного потока растёт, а расход потока, нагнетаемого в нижнее укрытие уменьшается (рисунок 2).

При отсутствии байпасирования и $Ke=0,6$ расход эжектируемого воздуха составил $Q_0 = 0.66 \text{ м}^3/\text{с}$, только при торцевом перетекании воздуха этот расход снизился на 26% до $Q_1 = 0.49 \text{ м}^3/\text{с}$, а при комбинированном байпасировании на 44% до $Q_2 = 0.37 \text{ м}^3/\text{с}$. При $Ke=3$ эти величины составят $Q_0 = 1.03 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_1 = 0.6 \text{ м}^3/\text{с}$ (на 42% меньше); $Q_2 = 0.24 \text{ м}^3/\text{с}$ (меньше на 77% по сравнению с Q_0). Существенное снижение расхода Q_1 , а, следовательно, и расхода аспирируемого воздуха Q_a , объясняется увеличением противодавлений в укрытиях при росте параметра Ke . Увеличивается разрежение $p_{1(1)}$ в верхнем укрытии и снижается разрежение в полости нижнего укрытия $p_{2(1)}$. Это влечёт рост расхода рециркулируемого воздуха при возрастании величины $\Delta p_{21(1)}$.

При комбинированном байпасировании интенсивность рециркуляции воздуха увеличивается, за счет течения воздуха через отверстия загрузочной трубы, при возрастании параметра эжекции Ke . Возрастают избыточные давления в жёлобе $p_u(0)$, байпасной камере $p_w(0)$, величине разности давлений $\delta p(0)$, $\delta p(1)$, что приводит к увеличению расхода рециркулируемого течения воздуха. При возрастании параметра эжекции Ke растут продольные скорости рециркулируемого, эжектируемого (рисунок 3) и перетекаемого воздуха (рисунок 4).

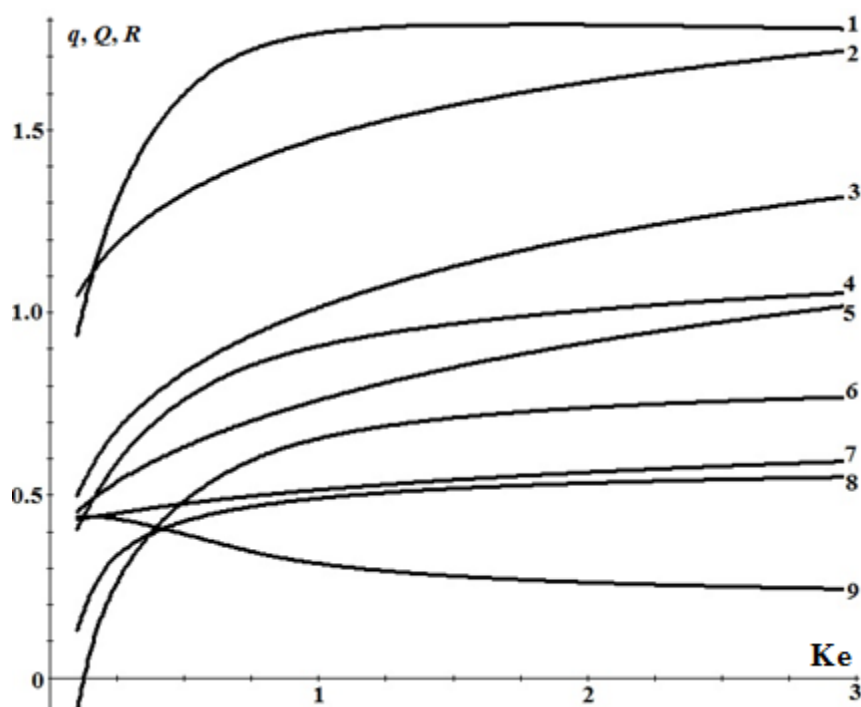


Рисунок 2 – Изменение расхода воздуха, увлекаемого сыпучим материалом в нижнее укрытие из приёмной камеры при торцевом перетекании воздуха Q_1 , при комбинированном байпасировании Q_2 и при его отсутствии Q_0 ; суммарного расхода эжектируемого и рециркулируемого воздуха Q_{u1} при торцевом перетекании воздуха, Q_{u2} при комбинированном байпасировании; отношение расходов $q_0 = Q_0 / Q_1$, $q_{02} = Q_{u2} / Q_1$, коэффициентов рециркуляции $R_{z1} = (Q_{u1} - Q_1) / Q_{u1}$; $R_{z2} = (Q_{u2} - Q_2) / Q_{u2}$ в зависимости от параметра эжекции Ке: 1 - q_2 ; 2 - q_0 ; 3 - Q_{u1} ; 4 - Q_{u2} ; 5 - Q_0 ; 6 - R_{z2} ; 7 - Q_1 ; 8 - R_{z1} ; 9 - Q_2

3. Экспериментальным путём выявлено, что при снабжении загрузочного канала аспирационного укрытия байпасной камерой, где перетекание воздуха осуществляется на их торцах, возникает рециркуляция воздуха, способствующая снижению расхода эжектируемого воздуха. Оптимальным отношением диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы является величина равная 2-2,5.

Для исследования динамики воздушных потоков и выявления оптимального соотношения размеров байпасной камеры и загрузочного канала при торцевом перетекании воздуха между загрузочной трубой и байпасной камерой была разработана экспериментальная установка (рисунок 5).

Для визуализации динамики воздушных потоков использовался дым, подаваемый в байпасную камеру. Наблюдения показали, что дым поднимался вверх, что объясняется возникновением разрежения в верхнем коробе и байпасной камере.

При совместной работе вентиляторов, дым также двигался вверх, но настился на боковую стенку байпасной камеры. Измерения скорости воздуха показали, что скорость воздуха от стенки загрузочной трубы к стенке байпасной камеры возрастает.

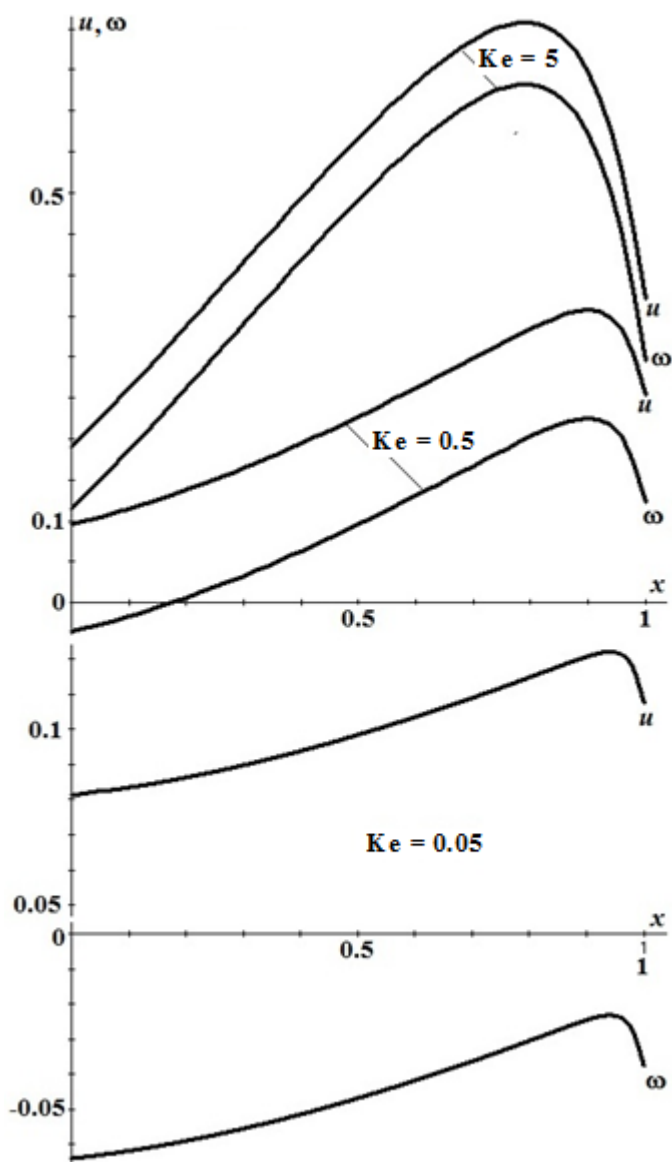


Рисунок 3 – Изменение скоростей эжектируемого воздуха и рециркулируемого потоков воздуха в байпасной камере по высоте падения сыпучего материала

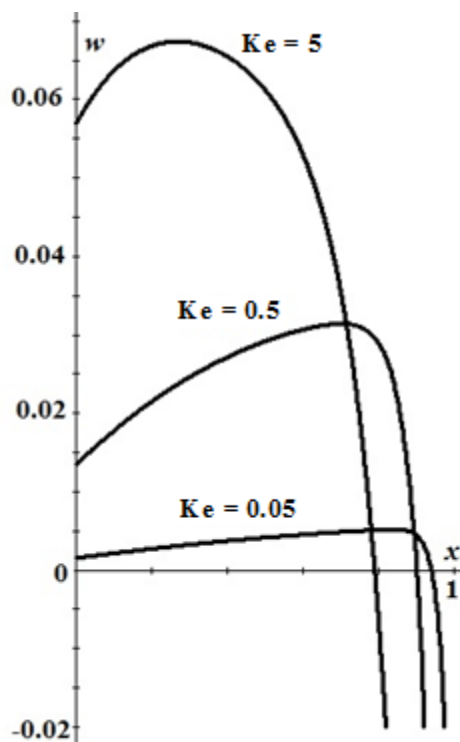


Рисунок 4 – Изменение скорости перетекания рециркулируемого воздуха через отверстия перфорации по высоте трубы

Измерение скорости в канале байпасной камеры производилось в трёх сечениях: А, В, С (рисунок 5).

Значения скоростей при совместной работе вентиляторов (таблица 1) практически не отличались от значений, полученных при работе лишь нагнетающего вентилятора.

Далее определялось влияние рециркуляции на скорость вытесняемого $v_{асн}$ (аспирируемого) из укрытия воздуха. Для этого рассматривался случай перекрытия байпасной камеры (отсутствие рециркуляции) и без ее перекрытия (присутствие рециркуляции). В обоих случаях работал только нагнетающий вентилятор.

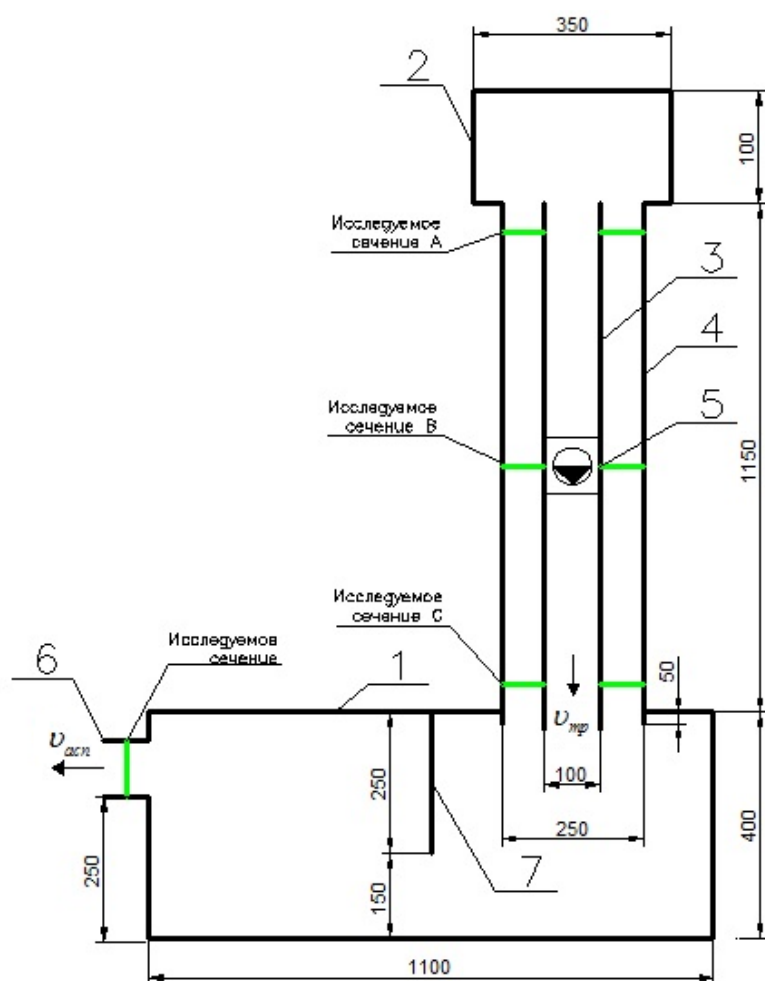


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – нижний короб укрытия;
- 2 – верхний короб укрытия;
- 3 – загрузочная труба;
- 4 – байпасная камера;
- 5 – нагнетатель;
- 6 – вытяжной патрубок (здесь располагался второй – вытяжной вентилятор);
- 7 – вертикальная перегородка

Усреднённая по времени скорость $v_{асп}$ измерялась в сечении вытяжного патрубка с помощью термоанемометра TESTO 425. Измерения проводились с верхним коробом и без него. Рециркуляция воздуха оказывает существенное влияние на скорость и расход аспирируемого воздуха (таблица 2).

Таблица 1

Экспериментальные значения скоростей воздуха в байпасной камере

| D_0 , мм | Для случая работы нагнетающего вентилятора | | | $v_{цир}$, м/с | $Q_{цир}$, м ³ /с | В случае совместной работы вытяжного и нагнетающего вентиляторов | | | $v_{цир}$, м/с | $Q_{цир}$, м ³ /с |
|------------|--|------|------|-----------------|-------------------------------|--|-------|------|-----------------|-------------------------------|
| | A | B | C | | | A | B | C | | |
| 200 | 1,02 | 1,08 | 1,2 | 1,08 | 91,4 | 1,0 | 1,074 | 1,19 | 1,07 | 91,0 |
| 250 | 0,67 | 0,73 | 0,96 | 0,73 | 108,3 | 0,49 | 0,6 | 0,87 | 0,6 | 89,0 |
| 300 | 0,34 | 0,45 | 0,7 | 0,45 | 101,7 | 0,32 | 0,35 | 0,49 | 0,35 | 79,1 |

Таблица 2

Экспериментальные значения скорости воздуха вытесняемого из аспирационного укрытия

| D_0 , мм | Без верхнего короба | | | С верхним коробом | | |
|------------|---------------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------|
| | $v_{асп}^b$, м/с | $v_{асп}^c$, м/с | δ , % | $v_{асп}^b$, м/с | $v_{асп}^c$, м/с | δ , % |
| 150 | 1,32 | 2,76 | 52 | 0,76-0,78 | 1,12 | 30-32 |
| 200 | 0,78 | 2,4 | 68 | 0,45-0,48 | 0,77 | 38-42 |
| 250 | 0,57 | 1,95 | 71 | 0,41 | 0,55 | 34 |
| 300 | 0,44 | 1,33 | 67 | 0,3-0,37 | 0,47 | 21-36 |

Величина $\delta = (v_{acn}^c - v_{acn}^b) / v_{acn}^c \cdot 100\%$ снижения скорости без перекрытия байпасной камеры v_{acn}^b относительно скорости воздуха с перекрытием байпасной камеры v_{acn}^c существенна и достигает наибольшего значения при диаметре D_6 байпасной камеры 200–250 мм, т.е. при отношении диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы равном 2-2,5.

4. Выявлено, что перфорирование загрузочной трубы при комбинированном использовании торцевого перетекания и перфорации приводит к снижению расхода аспирируемого воздуха только в случае, когда перфорация находится в области разрежения. Установлено, что использование торцевого перетекания воздуха между байпасной камерой и загрузочным каналом позволяет снизить в системе вентиляции расход аспирируемого воздуха до 69%, а при комбинированном использовании торцевого перетекания и перфорации - до 84%.

Для исследования рециркуляции воздуха в цилиндрической байпасной камере, при наличии перфорации на загрузочной трубе, экспериментальная установка претерпела некоторые изменения. Нижняя часть загрузочной трубы равномерно перфорировалась. В первом случае торцевые каналы байпасной камеры перекрывались, а во втором – перекрывался только нижний торцевой канал байпасной камеры. Диаметр байпасной камеры составлял 200 мм. Замеры, как и ранее, делались в сечении вытяжного патрубка.

Из сравнений скоростей воздуха (таблица 3) видно, что расход удаляемого воздуха может быть снижен на 18% только за счет перфорации. При наличии торцевого перетекания в цилиндрической байпасной камере диаметром 200 мм и отсутствии перфорации расход может быть снижен на 70%.

В эксперименте по выявлению эффекта снижения расхода, вытесняемого из укрытия воздуха при комбинированном байпасировании, вначале исследовалась рециркуляция воздуха при наличии торцевого перетекания и перфорации, нанесённой в области избыточного давления. Измеренные значения скорости не отличались от значений скорости удаляемого воздуха только при торцевом перетекании воздуха. Это объясняется тем, что воздух, выходящий из отверстий, создает воздушную завесу, увеличивая тем самым гидравлическое сопротивление байпасной камеры. Поэтому перфорировалась верхняя часть трубы (рисунок 6), расположенная в зоне разрежения. Перфорация производилась равномерно, начиная сверху трубы с увеличением количества отверстий. По мере роста количества отверстий перфорации скорость воздушного потока в сечении вытяжного канала снижалась (таблица 4).

Таким образом, при комбинированном байпасировании можно снизить расход аспирируемого воздуха на величину около 80%, что подтверждает достоверность теоретических исследований.

Значения скорости воздуха в вытяжном патрубке

| При отсутствии рециркуляции | | | |
|--|-------------|-------------|-----------|
| v_1 , м/с | v_2 , м/с | v_3 , м/с | v , м/с |
| 1,076 | 1,051 | 0,980 | 1,04 |
| При рециркуляции через отверстия перфорации | | | |
| 0,85 | 0,858 | 0,864 | 0,858 |
| При рециркуляции через торцевой канал байпасной камеры | | | |
| 0,311 | 0,319 | 0,322 | 0,317 |

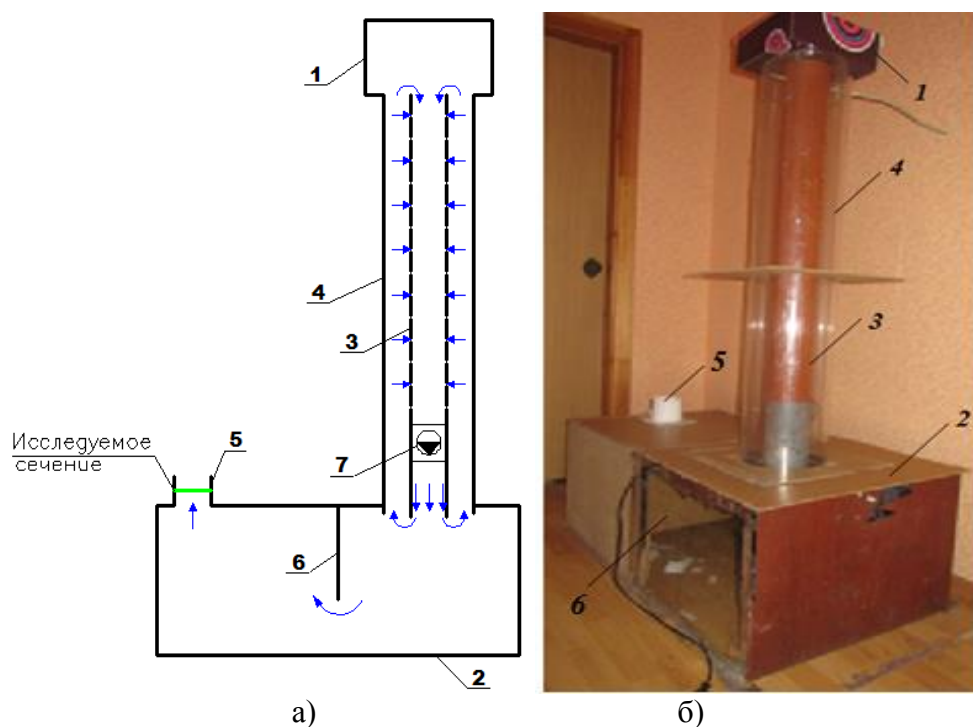


Рисунок 6 – Экспериментальная установка: а) схема экспериментальной установки для исследования совместной работы байпасной камеры и перфорированной загрузочной трубы: 1-2 – верхний и нижний короба, 3 - труба, 4 - байпасная камера, 5 - вытяжной канал, 6 - вертикальный щит (перегородка), 7 - нагнетатель; б) фото установки

Заключительный эксперимент проводился для реальной загрузки сыпучего материала и был предназначен для проверки достоверности результатов имитационного моделирования, где эжектирующая способность струи сыпучего материала заменялась действием нагнетающего вентилятора. Среднее значение расхода воздуха удаляемого из укрытия составило $23,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ при отсутствии рециркуляции и $10,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ при ее наличии, что подтверждает действие эффекта байпасирования на снижение объема эжектируемого воздуха, полученного в ходе имитации перегружаемого материала с помощью осевого вентилятора и коррелируется с теоретическими данными при малых параметрах эжекции.

Таблица 4

Скорости воздуха в вытяжном патрубке при различном количестве отверстий на загрузочной трубе при комбинированном использовании перфорации и байпасной камеры

| Кол-во отверстий Ø 5 мм, шт. | $v_1, \text{м/с}$ | $v_2, \text{м/с}$ | $v_3, \text{м/с}$ | $v, \text{м/с}$ | $Q_a, \text{м}^3/\text{ч}$ |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------------------|
| 0 | 0,282 | 0,281 | 0,287 | 0,283 | 8,002 |
| 77 | 0,26 | 0,262 | 0,261 | 0,261 | 7,380 |
| 154 | 0,267 | 0,254 | 0,255 | 0,259 | 7,323 |
| 231 | 0,254 | 0,232 | 0,234 | 0,240 | 6,786 |

5. Разработана методика расчета расходов эжектируемого, рециркулируемого и аспирируемого воздушных потоков при перегрузке сыпучего материала на телескопических станциях.

Расчётная схема перегрузки сыпучего материала на загрузочной телескопической станции представлена на рисунке 7.

Исходные данные для расчёта: G_m - массовый расход перегружаемого материала, кг/с; H_1 - высота желоба, м; d_1 - диаметр верхнего основания секции телескопической трубы, м; d_2 - диаметр нижнего ($d_2 < d_1$) основания этой секции, м; диаметр наружного рукава желоба D_n , м; средний зазор между смежными секциями желоба $z_c = (d_1 - d_2) / 2$, м; $D_1 = (d_1 + d_2) / 2$ - условный диаметр желоба, м; $S_g = \pi D_1^2 / 4$ - площадь сечения желоба, м²; $f_{z_0} = \pi D_1 z_c$ - условная площадь сечения одного зазора, м²; N_g - число секций в телескопической трубе, шт.; $S_z = f_{z_0} N_g$ - суммарная площадь всех зазоров, м²; $S_\omega = \pi(D_n^2 - D_1^2) / 4$ - площадь байпасной камеры, м²; $r = S_\omega / S_g$; $e_s = S_z / S_g$ - относительная степень проницаемости; ζ_0 - к.м.с. отверстия зазора; ζ_m - к.м.с. отверстий неплотностей наружной стенки аспирационного укрытия; $E = e_s / \sqrt{\zeta_0}$ - степень перетекания воздуха через перфорационные отверстия желоба; S_{nw} - площадь неплотностей верхнего укрытия, м²; S_{nk} - площадь неплотностей нижнего укрытия (приёмной камеры), м²; $\zeta_{nw} = 2,4(S_g / S_{nw})^2$ - коэффициент местных сопротивлений входа воздуха через неплотности верхнего укрытия; $\zeta_{nk} = 2,4(S_g / S_{nk})^2$ - коэффициент местных сопротивлений входа воздуха через неплотности нижнего укрытия; P_y - разрежение в аспирируемой камере нижнего укрытия, Па; F_a - площадь неплотностей наружной стенки аспирируемой камеры; ψ_0 - коэффициент лобового сопротивления одиночной частицы; ρ_m - плотность частиц, кг/м³; ρ_g - плотность воздуха в желобе, кг/м³; ρ_w - плотность наружного воздуха,

кг/м³; d_e - эквивалентный диаметр частиц, мм; H_0 - высота падения частиц, м; $v_n = \sqrt{2gH_0}$ - скорость частиц при входе в желоб, м/с; $v_k = \sqrt{2g(H_1 + H_0)}$ - скорость частиц при выходе из желоба, м/с; $n = v_n / v_k$ - отношение скоростей падения частиц; $p_y = 2P_y / (\rho g v_k^2)$ - безразмерное разрежение в аспирируемой камере нижнего укрытия.

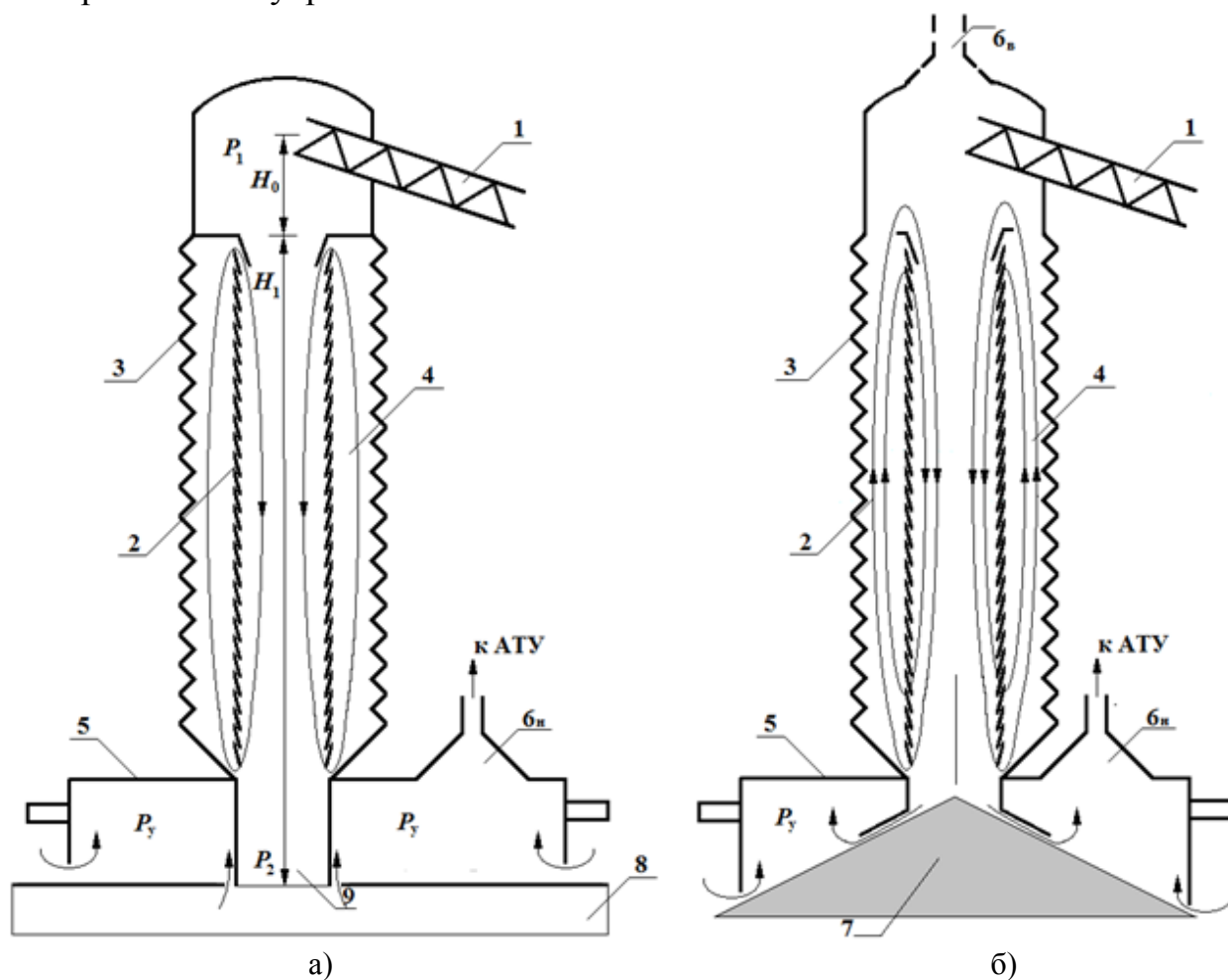


Рисунок 7 – Расчётная схема аспирации загрузки закрытого транспортного средства при помощи ТЗС – 1000 JETPASK: 1 – загрузочный шнек; 2 – телескопическая труба (желоб); 3 – гофрированная внешняя непроницаемая труба; 4 – байпасная камера с закрытыми (схема а) верхним и нижним днищами и с открытыми (схема б) днищами; 5 – аспирационное укрытие; 6_н – нижний аспирационный патрубок; 6_в – верхний аспирационный патрубок; 7 – штабель зернистого перегружаемого материала; 8 – закрытая ёмкость; 9 – загрузочная горловина

После формирования исходных данных расчёт производится в следующей последовательности.

1. Определяется объёмная концентрация падающих частиц в конце телескопического желоба: $\beta_k = G_m / (v_k \rho_m S_g)$ и посередине этого желоба: $\beta_y = 2G_m / (v_k (1 + n) \rho_m S_g)$.

2. Вычисляется средний коэффициент лобового сопротивления падающих частиц по формуле: $\psi = \psi_0 \exp[-56,92 \sqrt{\beta_y} / d_e]$.

3. Определяется параметр эжекции: $Ke = \psi \beta_k H_1 1500 / d_e$.

4. Вычисляется усреднённая скорость падения частиц в телескопической трубе; $v_s = b_0 + b_1 / 2 + b_2 / 6$, где коэффициенты определяются по формулам $b_0 = n$; $b_1 = \sqrt{8(1+n^2)} - 3n - 1$; $b_2 = 4(1+n - \sqrt{2(1+n^2)})$, где $n = v_n / v_k$.

5. Осреднённые скорости эжектируемого воздуха в телескопической трубе (u_s), скорости рециркулируемого воздушного потока в байпасной камере (ω_s) и скорости воздуха, перетекаемого из желоба через отверстия боковой стенки камеры (w_s) выражаются через неизвестный параметр u_n :

$$u_s = v_s - \sqrt{v_s(\zeta_p u_n^2 - p_y) / \text{Ke}}, w_s = u_n \sqrt{(0,25 + \zeta_n + |0,25 - \zeta_k|) / 3\zeta_0},$$

$$\omega_s = (u_s - u_n) / r, \zeta_p = \zeta_n + \zeta_k, \zeta_n = \zeta_{nw} + 0.5, \zeta_k = \zeta_{nk} + 1$$

6. Через записанные на предыдущем этапе величины вводятся функции, параметры, коэффициенты:

$$A = 2(u_s - \omega_s / r)E / (w_s \sqrt{\zeta_0}); B = (1 - u_s / v_s)\text{Ke} \cdot E / (w_s \sqrt{\zeta_0}); k_2 = 2b_2 A / B;$$

$$k_1 = (2A(b_1 - k_2) - b_2) / B; a_1 = A + \sqrt{A^2 + B}; a_2 = A - \sqrt{A^2 + B};$$

$$a_3 = n - k_1; b_3 = 1 - k_1 - k_2; a_4 = b_1 - k_2; b_4 = b_1 + b_2 - k_2; z_1 = e^{a_1} - e^{a_2};$$

$$C_1 = (u_n(1 - e^{a_2}) + a_3 e^{a_2} - b_3) / z_1; C_2 = (u_n(e^{a_1} - 1) - a_3 e^{a_1} + b_3) / z_1$$

и путём решения трансцендентного уравнения

$$(\zeta_p u_n^2 - p_y)E / (w_s \sqrt{\zeta_0}) - (C_1 a_1 (1 - e^{a_1}) + C_2 a_2 (1 - e^{a_2}) + a_4 - b_4) = 0$$

определяется безразмерная скорость эжектируемого воздуха при входе (и выходе) в телескопический жёлоб (u_n).

7. Производится расчёт скорости $u(x)$ (в произвольных сечениях желоба) на отрезке $x = 0 \dots 1$: $u(x) = C_1 e^{a_1 x} + C_2 e^{a_2 x} + b_0 - k_1 + x(b_1 - k_2) + b_2 x^2 / 2$ и определяется средняя скорость

$$u_s = C_1 (e^{a_1} - 1) / a_1 + C_2 (e^{a_2} - 1) / a_2 + b_0 + (b_1 - k_2) / 2 + b_2 / 6 - k_1.$$

8. Находится сечение x_m путём решения уравнения

$$C_1 a_1 e^{a_1 x_m} + C_2 a_2 e^{a_2 x_m} + b_1 + b_2 x_m - k_2 = 0$$

и рассчитывается максимальная величина безразмерной скорости эжектируемого воздуха

$$u_m = C_1 e^{a_1 x_m} + C_2 e^{a_2 x_m} + b_0 - k_1 + x_m (b_1 - k_2) + b_2 x_m^2 / 2.$$

9. Определяются максимальные объёмные расходы воздуха в сечении $x = x_m$. В телескопическом желобе Q_m по формуле: $Q_m = 3600 u_m v_k S_g$, рециркулируемом в байпасной камере Q_R по формуле: $Q_R = 3600 (u_m - u_n) v_k S_g$ и разность этих расходов – т.е. величину $Q_o = Q_m - Q_r$.

10. Вычисление безразмерного избыточного давления на днище байпасной камеры p_a в соответствии с формулой:

$$p_a = 0,5((\zeta_k - \zeta_n)u_n^2 - p_y) + 0,5w_s \sqrt{\zeta_0} [C_1 a_1 (1 + e^{a_1}) + C_2 a_2 (1 + e^{a_2}) + a_4 + b_4] / 2E.$$

11. Выполняются с заданным шагом на интервале $x=0\dots 1$ расчёты следующих безразмерных функций:

$$u(x) = C_1 e^{a_1 x} + C_2 e^{a_2 x} + b_0 - k_1 + x(b_1 - k_2) + 0,5b_2 x^2 \quad p_\omega(x) = p_a - 4\omega_s(u(x) - u_n) / r,$$

$$p(x) = p_\omega(x) - w_s \sqrt{\zeta_0} (C_1 a_1 e^{a_1 x} + C_2 a_2 e^{a_2 x} + b_1 - k_2 + b_2 x) / E,$$

$$\Delta p(x) = -p(x) + p_\omega(x), \quad w(x) = \Delta p(x) / (\zeta_0 w_s).$$

12. Производится расчёт безразмерной скорости эжектируемого воздуха (u_2) из уравнения:

$$\frac{3}{|1 - u_2|^3 - |n - u_2|^3} - \frac{2Ke}{(\zeta_p u_n^2 - p_y)(1 - n^2)} = 0;$$

и его расход $Q_2 = 3600 u_2 v_k S_g$ м³/ч для случая полной герметизации стенок желоба (т.е. при отсутствии рециркуляции воздуха в байпасной камере).

13. Вычисляются: расход воздуха, поступающего из желоба в аспирируемое укрытие - $Q_g = 3600 u_n v_k S_g$, м³/ч; расход воздуха, поступающего в это же укрытие через неплотности - $Q_n = 3600 F_a \sqrt{2P_y / (\zeta_m \rho_w)}$, м³/ч и необходимый расход воздуха, удаляемый из аспирационного укрытия $Q_a = Q_g + Q_n$.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам диссертационного исследования получены следующие результаты.

1. На основе дифференциальных уравнений эжектируемого воздуха в вертикальной перфорированной трубе, при перемещении в ней потока сыпучего материала, и рециркулируемого воздушного потока в байпасной камере, разработана математическая модель комбинированной рециркуляции воздуха через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры. Путём решения дифференциальных уравнений выявлены закономерности снижения объёмов эжекции за счет рециркуляции воздуха.

2. Теоретически доказано, что организация рециркуляции воздушных потоков при комбинированном байпасировании снижает расход воздуха, увлекаемого потоком сыпучего материала в нижнее укрытие (приёмную ёмкость), а значит, снижается расход отсасываемого воздуха, что приводит к снижению энергозатрат на эксплуатацию систем вентиляции.

Выявлены закономерности изменения: расходов эжектируемого и рециркулируемого воздушных потоков в зависимости от способа организации рециркуляции и параметра эжекции; скорости воздуха по длине загрузочной трубы; статических давлений в верхнем и нижнем укрытиях, на концах загрузочной трубы от параметра эжекции. Показано, что при небольших параметрах эжекции ($Ke = 0,6$), только при торцевом перетекании воздуха, расход нагнетаемого в укрытие воздуха снижается в 1,35 раза относительно случая перегрузки материала в трубе с непроницаемыми

стенками, а при комбинированном байпасировании - в 1,78 раза. При увеличении параметра эжекции до трёх наблюдается большее снижение расхода эжектируемого воздуха. При торцевом перетекании воздуха этот расход уменьшается в 1,72 раза, а при комбинированном байпасировании - в 4,29 раза.

3. Путём натурального эксперимента по исследованию рециркуляции воздуха, в соосно расположенных круглой загрузочной трубе и круглой байпасной камере, выявлено, что при снабжении загрузочного канала аспирационного укрытия байпасной камерой, где перетекание воздуха осуществляется на их торцах, возникает рециркуляция воздуха. Экспериментально доказано, что явление рециркуляции воздуха способствует снижению расхода воздуха, вытесняемого из укрытия, а значит и объёма эжектируемого воздуха. Наиболее рациональным представляется соотношение диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы равное 2-2,5.

В результате численного и натурального экспериментов показано, что скорость рециркулируемого воздуха снижается при увеличении радиуса байпасной камеры. Величины скорости, найденные экспериментально и численно, удовлетворительно согласуются.

Определено, что нанесение отверстий на загрузочную трубу при комбинированном использовании байпасной камеры и перфорации приводит к снижению расхода эжектируемого воздуха только в случае, когда перфорация находится в области разрежения. При нанесении перфорации в области избыточного давления, воздух, выходящий из отверстий в полость байпасной камеры, создаёт сопротивление восходящему потоку, что препятствует движению рециркулируемого воздуха.

Использование одной лишь байпасной камеры может снизить количество удаляемого воздуха до 69%, а при комбинированном использовании камеры и перфорации - до 84%, что согласуется с теоретическими расчётами.

4. Разработана инженерная методика расчёта объёмов аспирируемого воздуха при перегрузках сухих ненагретых материалов с естественной циркуляцией, осуществляемой посредством комбинированного использования цилиндрической байпасной камеры и перфорированной загрузочной трубы.

Разработаны рекомендации по проектированию местных отсосов закрытого типа сниженной энергоёмкости.

Разработана методика расчёта расхода эжектируемого воздуха в телескопических погрузчиках.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят: в разработке и совершенствовании систем промышленной вентиляции, за счет использования как рециркуляционных, так и закрученных воздушных течений, а также за счет развития методов их расчёта, при помощи современных методов вычислительной аэромеханики.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах согласно Перечню ВАК

1. **Крюков, И.В.** Особенности рециркуляции воздуха в перегрузочном желобе с комбинированной байпасной камерой. Сообщение 1. Основные уравнения [Текст]/ И.В. Крюков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. - 2013. - № 4. - С. 62-71.

2. **Крюков, И.В.** Особенности рециркуляции воздуха в перегрузочном желобе с комбинированной байпасной камерой. Сообщение 2. Решение уравнений и результаты расчёта [Текст]/ И.В. Крюков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. - 2013. - № 5. - С. 54-62.

3. Аверкова, О.А. Имитационное моделирование эжекции воздуха в круглой трубе с байпасной камерой [Текст]/ О.А. Аверкова, **И.В. Крюков**, Е.И. Толмачева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2015. - №2. - С. 207-211.

4. **Крюков, И.В.** Исследование процессов минимизации объёмов удаляемого воздуха при комбинированном использовании перфорированного желоба с цилиндрической байпасной камерой [Текст]/ И.В. Крюков, И.Н. Логачев, В.А. Уваров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2016. - №8. - С. 108-112.

5. **Крюков, И.В.** Исследование процессов рециркуляции воздуха в перфорированном желобе с байпасной камерой, находящимся под избыточным давлением [Текст]/ И.В. Крюков, И.Н. Логачев, В.А. Уваров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2016. - №7. - С. 85-89.

6. **Крюков, И.В.** Аналитическое и экспериментальное исследование рециркуляции воздуха в загрузочной пористой трубе с комбинированной байпасной камерой [Текст]/ И.В. Крюков [и др.] // Инженерно-физический журнал. - 2017. - Т.90, №2. - С. 342-351.

7. **Крюков, И.В.** Снижение объёмов удаляемого воздуха в системах обеспыливающей вентиляции при перегрузке материала за счет организации естественной циркуляции воздуха [Текст]/ И.В. Крюков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2017. - №2. - С. 149-153.

8. **Крюков, И.В.** Разработка инженерной методики расчёта системы аспирации с укрытием, оборудованном байпасной камерой и перфорированным желобом [Текст]/ И.В. Крюков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2017. - №3. - С. 66-69.

Научные труды, индексируемые в Scopus и (или) в Web of Science

9. **Kryukov, I.V.** Methods of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems. Part 1. Derivation of Hydrodynamic Equations of Air Ejection by a stream of Free-Flowing Material in a Perforated Trough with Bypass Chamber / I.V. Kryukov [etc.] // Refractories and Industrial Ceramics. - 2014. - 55(1). - P. 70-76.

10. Logachev, K.I. Simulation of air flows in ventilation shelters with recirculation / K.I. Logachev, O.A. Averkova, **I.V. Kryukov** // Refractories and Industrial Ceramics. - 2015. - 56(4). - P. 428-434.

Объекты интеллектуальной собственности

11. ПМ 136857 Российская Федерация, МПК E21F 5/00. Аспирационное укрытие места выгрузки сыпучего материала/ **Крюков И.В.** [и др.]; заявитель и патентообладатель федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова). - № 2013135082/03 ; заявл. 25.07.2013 ; опубл.: 20.01.2014, Бюл. № 2.

12. ПМ 146813 Российская Федерация МПК E21F 5/00. Аспирационное укрытие места перегрузки сыпучего материала/ **Крюков И.В.** [и др.]; заявитель и патентообладатель федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический

университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова). – № 2014115752/03 ; заявл. 18.04.2014. опубл.: 20.10.2014 Бюл. № 29.

В других изданиях

13. Аверкова, О.А. Моделирование эжекции воздуха в круглой цилиндрической трубе с соосно расположенной цилиндрической камерой / О.А. Аверкова, **И.В. Крюков**, Е.И. Толмачева // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) , № 4 / 2014 , (ЧАСТЬ 5). – С. 103-106.

14. **Крюков, И.В.** Особенности расчёта аспирационных течений при перегрузках порошкообразных слипающихся материалов [Электронный ресурс]/ И.В. Крюков [и др.]// Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области (9.04.2015.-10.04.2015), Белгород – БГТУ им. В.Г.Шухова, 2015. – С. 9.

15. **Крюков, И.В.** Междисциплинарные задачи локализации пылегазовых выбросов [Электронный ресурс]/ И.В. Крюков [и др.] // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области (25.02.2016-26.02.2016), Белгород – БГТУ им. В.Г.Шухова, 2016. – С. 17.

16. **Крюков, И.В.** Разработка эффективной системы обеспыливающей вентиляции за счет рециркуляции воздуха [Электронный ресурс]/ И.В. Крюков, О.С. Крюкова // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (12.12.2016 – 16.12.2016), Екатеринбург – УрФУ, 2016. – С. 155-158.