

На правах рукописи

Попов

ПОПОВ ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СИСТЕМ
ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ СЫПУЧИХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

**Специальность: 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

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

Научный руководитель

Логачев Константин Иванович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Беспалов Вадим Игоревич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет», кафедра
«Инженерная защита окружающей среды»,
заведующий кафедрой, профессор,
г. Ростов-на-Дону;

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

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»

Защита диссертации состоится 26 июня 2018 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, 2-я Красноармейская ул., 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 <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/popov-evgeniy-nikolaevich>.

Автореферат разослан 14 мая 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Виктор Алексеевич Пужал

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Переработка сырья на горноперерабатывающих комбинатах, как правило, начинается с измельчения горной породы при котором материал многократно загружается в промежуточные и накопительные бункера.

Расход воздуха систем обеспыливающей вентиляции (аспирационного воздуха), удаляемого от местных отсосов, является основным параметром, определяющим энергоемкость и стоимость эксплуатации технологической вентиляции. В условиях переработки сыпучих материалов, необходимая производительность местных отсосов определяется санитарно-гигиеническими и технологическими требованиями.

Санитарно-гигиенические требования направлены на обеспечение устойчивого разрежения в местных отсосах закрытого типа (аспирационных укрытиях), препятствующего истечению запыленного воздуха через щели или неплотности и рабочие проемы в воздух рабочей зоны.

Однако, при увеличении производительности вытяжной вентиляции, кроме энергозатрат растут и эксплуатационные затраты за счет повышенного уноса пылевых фракций с аспирируемым воздухом.

Поэтому на практике в качестве расчетного расхода удаляемого воздуха принимается такой минимальный расход, который удовлетворяет санитарным, технологическим и строительным требованиям. Устанавливаемое при этом в укрытии разрежение определяется, как правило, по опыту эксплуатации аналогичных производств и зависит от конструктивно-технологических параметров перегрузки, параметров укрытия, от вида и особенностей перерабатываемого материала.

Существующие методики определения расхода, увлекаемого перегружаемым материалом воздуха, предполагают замену реального полифракционного материала монофракционным, имеющим частицы некоторого среднего (или эквивалентного) диаметра. Большая часть перерабатываемых в горно-рудном деле материалов являются полифракционными, что приводит к необходимости введения опытных коэффициентов в аэродинамические характеристики частиц.

В случае значительной площади загрузочных проемов, характерных для бункеров открытого типа, как правило, руководствуются величиной защитной скорости 0,5–1 м/с, обеспечивающей отсутствие выбивания запыленного воздуха из полости бункера. Такой подход не учитывает, как особенностей самого перегружаемого материала, так и аэродинамических процессов, протекающих внутри бункера, что приводит к значительным расходам аспирационного воздуха.

В связи с этим уточнение существующих методик расчета и проектирования систем обеспыливающей вентиляции на предприятиях горноперерабатывающей отрасли является актуальной задачей.

Данная работа выполнена на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) в рамках следующих НИР: гранта Президента

Российской Федерации "Разработка методов пыле- и газоулавливания в пыльных цехах промышленных предприятий" НШ-588.2012.8 (2012 г.); НИР Б8/13 «Разработка методик расчета систем обеспыливания и исследование условий загрузки бункеров с учетом дисперсности материалов» (2013-2014); гранта РФФИ № 14-41-08005 р_офи_м «Математическое моделирование процессов аспирации и разработка научных основ создания энергоэффективных систем локализации пылегазовых выделений» (2014-2016); программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова по проекту № А-55/17 «Разработка систем обеспыливания бункеров предприятий горноперерабатывающей отрасли с учетом полидисперсности перегружаемого материала» (2017–2018); гранта РФФИ 16-08-00074а «Моделирование закрученных потоков в системах аспирации» (2017-2018).

Степень разработанности. Проблемам конструирования рациональных систем аспирации при переработке сыпучих материалов посвящены труды многих ученых начиная с сороковых годов XX века – это труды М.К. Альтмарка, Рекка, Е.Н. Бошнякова, Стахорского. Фундаментальные основы энергетической теории эжектирования воздуха ускоренным потоком падающих частиц были заложены С.Е. Бутаковым в 1949 г. и в дальнейшем развиты О.Д. Нейковым в 1969 г. В последние годы проблемой снижения расходов аспирируемого воздуха в России занимались В.М. Василевский, В.И. Беспалов, Д.П. Боровков, И.Н. Логачев, К.И. Логачев, П.И. Килин, В.А. Минко, изучившие закономерности движения сыпучих материалов по желобам. Математическим моделированием в проектировании систем вентиляции занимались А.М. Гримитлин, Т.А. Дацюк, А.М. Зиганшин, В.Н. Посохин исследованиями турбулентных воздушных течений в замкнутых объемах – В.М. Уляшева, В.Р. Таурит. За рубежом известны работы Qin Liu E.A., Anderson D.M., Bianconi W.O.A, Nath T., Nemeon W.C.L., Jones M.G., Wurych P.W. Однако в трудах этих ученых рассматриваются преимущественно монофракционные перегрузки сыпучих материалов, в то время как большинство перерабатываемых в действительности материалов являются полифракционными. Так же при расчетах систем аспирации загрузок бункеров не учитывались процессы эжектирования воздуха потоком материала внутри бункера, что актуально для бункеров больших размеров, например, бункеров открытого типа.

Целью работы является совершенствование методов расчета и проектирования систем обеспыливающей вентиляции при загрузке бункеров открытого типа, с учетом фракционного состава перегружаемого материала для горноперерабатывающих предприятий и предприятий по производству строительных материалов.

Поставленная цель определяет следующие **задачи исследования**:

- проанализировать существующие методы расчета производительности систем обеспыливающей вентиляции при перегрузках сыпучих материалов;
- разработать математическую модель воздушного течения, увлекаемого сыпучим полифракционным материалом, на основании которой выявить влия-

ние фракционного состава материала на расход эжектируемого воздуха и взаимодействие пылевых частиц различных фракций;

- разработать метод определения аэродинамического сопротивления множества падающих частиц различной дисперсности;

- разработать экспериментальную установку и исследовать явление эжекции воздуха полифракционным потоком загружаемого материала;

- разработать технические предложения по совершенствованию систем обеспыливающей вентиляции бункеров открытого типа;

- произвести экспериментальные исследования по выявлению эффективности предложенных устройств при загрузке полидисперсного материала в бункера открытого типа;

- разработать инженерную методику расчета расхода аспирируемого воздуха при загрузке бункеров полидисперсным материалом.

Объект исследования – система обеспыливающей вентиляции при загрузке открытых бункеров сыпучим полифракционным материалом.

Предмет исследования – процессы эжектирования воздуха полифракционным материалом.

Новизна работы заключается:

- Предложен новый вероятностно-статистический подход определения влияния стеснённости на коэффициент лобового сопротивления частиц в условиях свободного потока полифракционного материала.

- Уточнено влияние фракционного состава материала на объёмный расход аспирируемого воздуха.

- Выявлены закономерности влияния геометрических параметров бункеров и узлов загрузок бункеров на производительность систем местной вытяжной вентиляции.

- Разработан способ снижения расхода эжекционной струи воздуха в полостях бункеров открытого типа и уменьшения массового расхода пылевых выбросов, выбиваемых из проёмов, за счет организации рециркуляционных воздушных течений.

- Предложена методика расчета объёмного расхода аспирируемого воздуха, учитывающая влияние полидисперсности перегружаемого материала.

Практическая значимость. Предложена уточненная методика расчета расходов аспирации при загрузке бункеров, учитывающая влияние полидисперсности перегружаемого материала и особенности течений воздуха внутри бункера.

Разработаны технические предложения по снижению производительности вытяжной вентиляции путем уменьшения кинетической энергии эжекционного воздуха в полости бункеров.

Полученные рекомендации по рациональным параметрам основных конструктивных элементов уплотнений загрузочных проёмов бункеров могут быть использованы при расчете и проектировании систем обеспыливающей вентиляции горноперерабатывающих предприятий и предприятий по производству строительных материалов.

Усовершенствованная методика расчета расхода аспирационного воздуха нашла применение при проектировании обеспыливающих систем:

- систем аспирации дробильно-сортировочного участка ОАО «Стойленский ГОК»;
- систем аспирации цеха водосодержащих эмульсий филиала ООО «Тиккурила» г. Старый Оскол.

Результаты проведенных исследований используются в учебном процессе БГТУ им. В.Г. Шухова при составлении курсов «Основы проектирования и конструирования обеспыливающих систем», «Вентиляция».

Методы исследования включали аналитическое обобщение известных научных и технических результатов; математическое моделирование процессов и явлений на основе современных программных комплексов и разработанных программ; методы вычислительной математики, теории вероятности и математической статистики; современные методы проведения аэродинамического эксперимента и обработки экспериментальных данных.

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».

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 15 печатных работах, в том числе 5 статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК России.

На защиту выносятся:

- вероятностно-статистический метод определения коэффициента лобового сопротивления частиц в свободном потоке полифракционного материала;
- полученные закономерности влияния фракционного состава материала на объёмный расход аспирируемого воздуха;
- выявленные закономерности влияния геометрических параметров узлов загрузок бункеров на объёмный расход аспирируемого воздуха;
- инженерная методика расчета расходов аспирационного воздуха при загрузке бункеров полифракционным материалом.
- способ снижения расхода эжекционной струи воздуха и конструкции внутрибункерных экранов для разрушения направленных потоков эжектируемого воздуха.

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

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих научно-практических конференциях: всероссийской науч-

но-практической конференции «Современные проблемы технического, естественнонаучного и гуманитарного знания» (г. Губкин, 2007 г.), международной научно-практической конференции «Современные проблемы науки образования и производства» (Нижний Новгород, 2010 г.), III международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь в начале нового столетия» (г. Губкин, 2010), региональной научно-технической конференции по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области (г. Белгород, 2017).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы (114 источников) и 4 приложений. Диссертация изложена на 166 страницах машинописного текста и содержит 62 рисунка и 14 таблиц.

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

1. Предложен новый вероятностно-статистический подход определения влияния стеснённости на коэффициент лобового сопротивления частиц в условиях свободной струи полифракционного материала.

В отличие от достаточно полно изученного механизма межкомпонентного взаимодействия в потоке усредненных по крупности частиц рассматривается аэродинамическое взаимодействие потока частиц с разными эквивалентными диаметрами $d_1 > d_2 > \dots > d_N$, т. е. поток полифракционного сыпучего материала, состоящего из N фракций (рисунок 1).

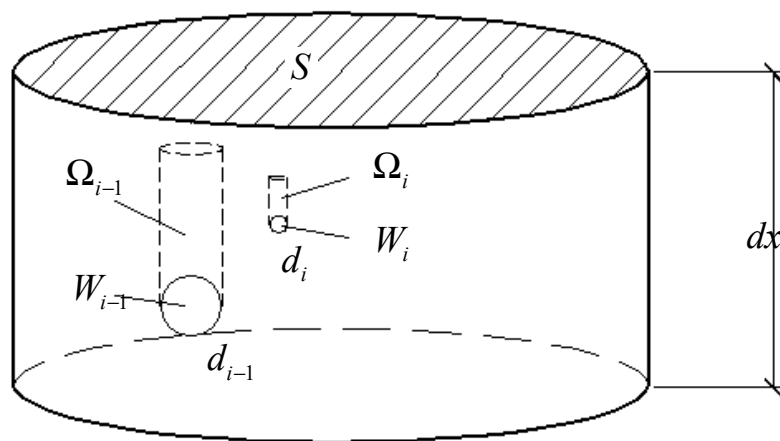


Рисунок 1 – Элементарный объем потока падающих частиц

Предполагается, что коэффициент лобового сопротивления частиц i -й фракции пропорционален вероятности активного аэродинамического взаимодействия этой частицы $P_i(A)$:

$$\psi_i = K_p \cdot \psi_{0i} \cdot P_i(A); \quad P_i(A) = 1 - P_i(T_i), \quad (1)$$

где $K_p \leq 1$ – коэффициент пропорциональности (в дальнейшем $K_p = 1$); $P_i(T_i)$ – вероятность нахождения частицы в аэродинамической тени; ψ_{0i} – коэффициент лобового сопротивления одиночной частицы i -й фракции.

Под вероятностью $P_i(A)$ принималось отношение объема частиц, находящихся вне аэродинамической тени, к общему объему частиц в рассматриваемом объеме двухкомпонентной смеси. Ее величина в процессе падения частиц будет возрастать практически от нуля (в момент сбрасывания, когда все частицы находятся в аэродинамической тени соседних частиц) до величины, близкой к единице (при разреженном коллективе частиц, падающих с большой скоростью).

При равновероятном размещении в рассматриваемом элементарном объеме $dV = S \cdot dx$ частиц d_1, d_2, \dots, d_N с объемной концентрацией $\beta_i = G_i / (S \cdot \rho \cdot v)$, где $G_i = m_i G$, $\beta = \sum_{i=1}^N \beta_i$, m_i – массовое содержание в потоке частиц крупностью d_i , (в долях).

Вероятность активного воздействия частиц крупностью d_i на увлекаемый воздух определяется соотношением:

$$P_i(A_i) = (\Omega_i / W_i) \cdot \beta_i / (1 - \beta). \quad (2)$$

Вероятностью размещения в этой тени второй частицы крупностью d_i пренебрегалось, в отличие от вероятности размещения этих частиц в тени более крупных частиц d_{i-1} , в силу неравенства $\Omega_{i-1} / W_i \gg \Omega_i / W_i$.

Вероятность расположения частиц диаметром d_i в аэродинамической тени одной частицы d_{i-1} определяется из следующей формулы:

$$P_i(T) = \Omega_{i-1} \cdot c_{i-1} / (1 - \beta). \quad (3)$$

Объемная концентрация частиц диаметром d_i в элементарном объеме $dV = S \cdot dx$ (рисунок 1)

$$\beta_i = \frac{m_i \cdot G}{S \cdot \rho \cdot v_i}, \quad (4)$$

где v_i – скорость частиц диаметром d_i , м/с.

Число этих частиц в элементарном объеме $S \cdot dx$:

$$\frac{\beta_i \cdot S \cdot dx}{W_i} = c_i \cdot S \cdot dx, \quad (5)$$

где $c_i = \beta_i / W_i$ – счётная концентрация частиц диаметром d_i , шт./м³:

Суммарный объем аэродинамической тени этих частиц в элементарном объеме $S \cdot dx$, с учетом того, что

$$\Omega_i = K_i \cdot W_i, \quad (6)$$

где $K_i \approx 10 \div 100$ – отношение объема аэродинамической тени к объему одной частицы i -й фракции, выражается следующим образом:

$$\frac{\Omega_i}{S \cdot dx} = K_i \cdot \beta_i. \quad (7)$$

Все частицы i -й фракции были разделены на два класса: аэродинамически активные частицы, которые с равной возможностью размещены по всему элементарному объёму потока, свободному от частиц всех фракций $\left(1 - \sum_{i=1}^n \beta_i\right) \cdot S \cdot dx$ и класс аэродинамически неактивных частиц, которые размещены в аэродинамической тени как частиц i -й фракции, так и частиц более крупных фракций. Полагалось, что активные частицы участвуют в межкомпонентном динамическом взаимодействии, величина которого представляется в виде суммы аэродинамических сил свободных частиц (без учета эффекта стесненности). Частицы, находящиеся в аэродинамической тени, не участвуют в этом взаимодействии по двум причинам. Во первых, коэффициент лобового сопротивления затененных частиц намного меньше свободных и, во вторых, из-за малости относительной скорости их падения в теневой зоне, по сравнению с относительной скоростью $(v_i - u)$ активных частиц.

Сумма вероятностей нахождения частиц с диаметрами d_i в аэродинамической тени более крупных частицы d_{i-1} ($d_{i-1} > d_i$) определяется из следующей формулы:

$$\sum_{i=1}^N P_i(T_{i-1}) = K \cdot \frac{\beta}{1 - \beta}, \quad (8)$$

где $K_1 = K_2 = \dots = K_N = K$.

Коэффициент активного аэродинамического сопротивления частиц (находящихся вне теней) с диаметром d_i определяется из выражения:

$$\psi_{(d_i)} = \left(1 - K \cdot \frac{\sum_{j=1}^i \beta_j}{1 - \beta} \right) \cdot \psi_0 \quad (9)$$

где ψ_0 – коэффициент лобового сопротивления одиночной (свободной) частицы диаметром d_N .

Из анализа выражения (9) следует, что суммарная аэродинамическая тень более крупных частиц $K \cdot \sum_{j=1}^i \beta_j$ будет больше свободной (от всех частиц) части объёма воздуха $1 - \beta$. Тогда коэффициент $\psi_{(d_i)}$ будет меньше нуля (в силу того, что $K \cdot \sum_{j=1}^i \beta_j > (1 - \beta_i)$) и в расчётах нужно принимать для частиц этих фракций $\psi_{(d_i)} = 0$. Это случай «пересечения» аэродинамических теней крупных частиц. Все мелкие частицы переходят в класс неактивных частиц.

Аэродинамическое воздействие на воздух коллектива падающих частиц в струе полифракционного материала (сумма аэродинамических сил) определяется из дифференциального уравнения:

$$d((1-\beta) \cdot \rho_e \cdot u \cdot S) \cdot u = \left(\sum_{i=1}^N R_i \cdot c_i \right) \cdot S \cdot dx, \quad (10)$$

где c_i – счетная концентрация этих частиц в элементарном объеме струи $S \cdot dx$, $1/\text{м}^3$; R_i – аэродинамическая сила динамического взаимодействия одиночной частицы диаметром d_i , определяемая с помощью коэффициента аэродинамического сопротивления:

$$R_i = \psi_i \cdot F_{mi} \cdot \rho \cdot \frac{(v_i - u)^2}{2}. \quad (11)$$

Полагалось $S = \text{const}$, падение частиц равноускоренное: $v_i = v = \sqrt{2 \cdot g \cdot x + v_0^2}$, где g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; x – высота свободного падения, м ; v_0 – начальная скорость падения (при $x = 0$), $\text{м}/\text{с}$.

Выражение в скобках правой части уравнения (10) представляет собой сумму аэродинамических сил всех частиц полифракционного материала в единице объема потока этих частиц S_a . При $v, u, \rho = \text{const}$ в поперечном сечении струи

$$S_a = \frac{3}{4} \rho (v - u)^2 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{\beta_i}{d_i} \cdot \psi_i. \quad (12)$$

Разработанная модель аэродинамического взаимодействия частиц позволяет производить расчет систем обеспыливающей вентиляции с учетом фракционного состава материала.

2. Уточнено влияние фракционного состава материала на объёмный расход аспирируемого воздуха.

Различные по природе материалы и прошедшие различную механическую обработку имеют различные гранулометрические составы, но при этом могут иметь близкие среднемассовые диаметры, в зависимости от которых определяется расход эжектируемого воздуха (рисунок 2). Данное обстоятельство приводит к значительным погрешностям в определении расходов обеспыливающей вентиляции.

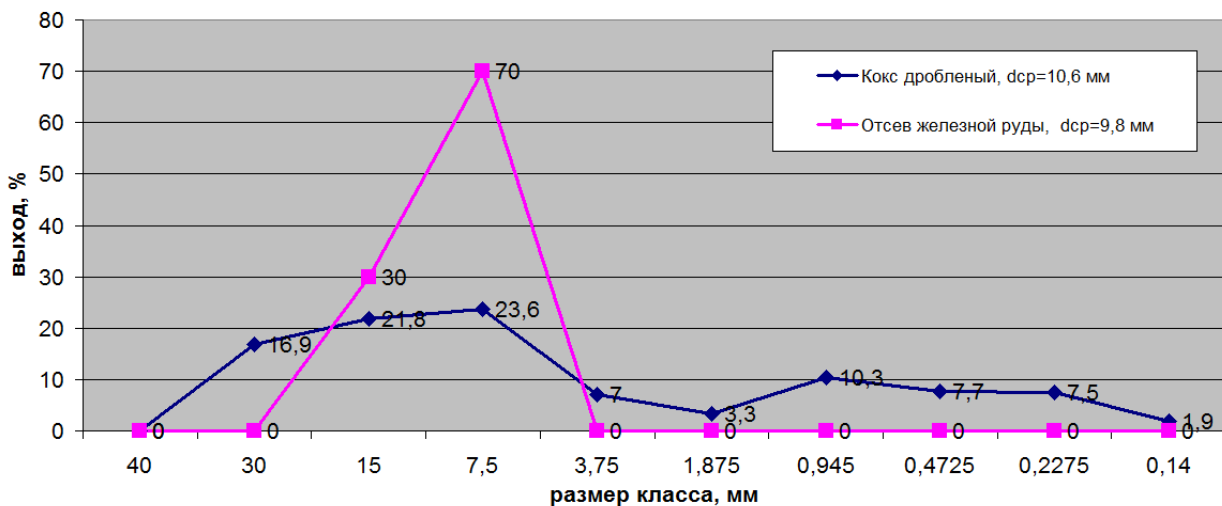


Рисунок 2 – Гранулометрические составы некоторых полифракционных материалов

Для выявления характера влияния фракционного состава материала на объемы аспирируемого воздуха была собрана экспериментальная установка в варианте А (рисунок 3). Видеокамера, падающая вдоль направляющих, позволяла зафиксировать качественную картину взаимодействия частиц, а также оценить скорости частиц, как в продольной плоскости падения, так и в поперечных сечениях (рисунок 4).

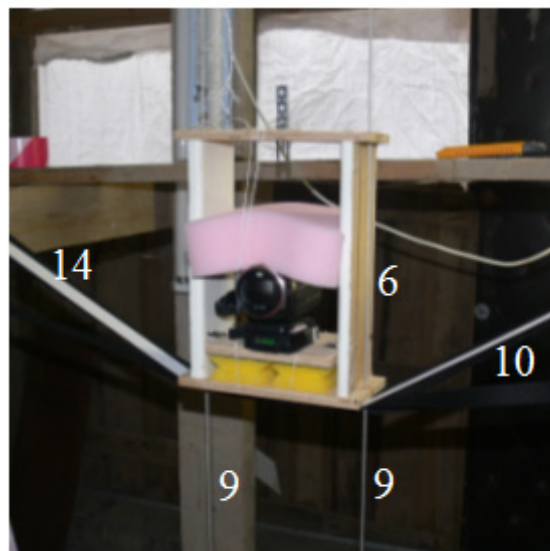
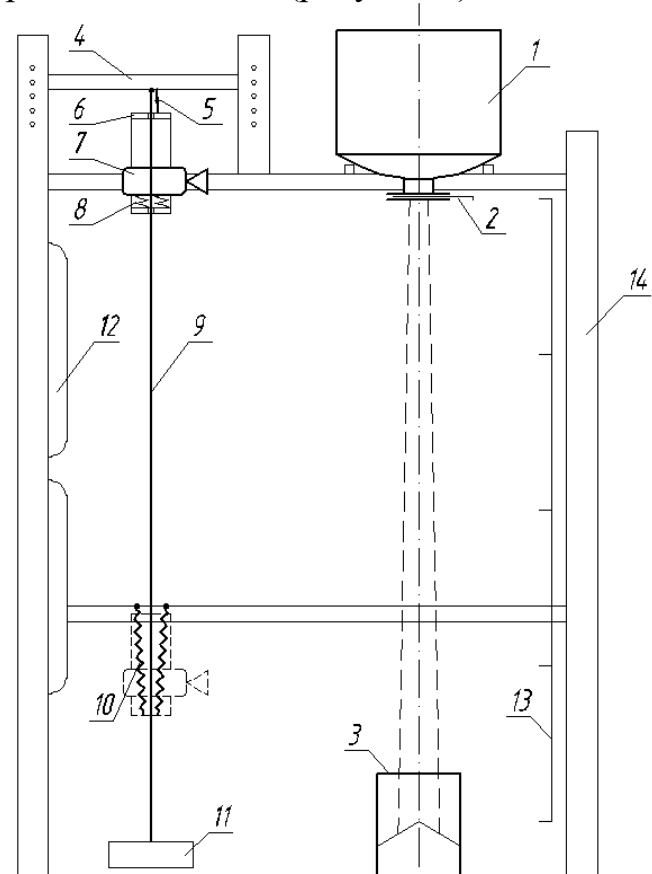


Рисунок 3 – Схема экспериментального стенда (вариант А):

1 – верхний бункер; 2 – шиббер-диафрагма;
3 – нижний бункер; 4 – рейка регулировки по высоте; 5 – цепное устройство; 6 – скользящий держатель; 7 – видеокамера; 8 – амортизаторы; 9 – направляющие тросики; 10 – тормозные резинки; 11 – груз-стабилизатор; 12 – освещение; 13 – экран со шкалой; 14 – рама

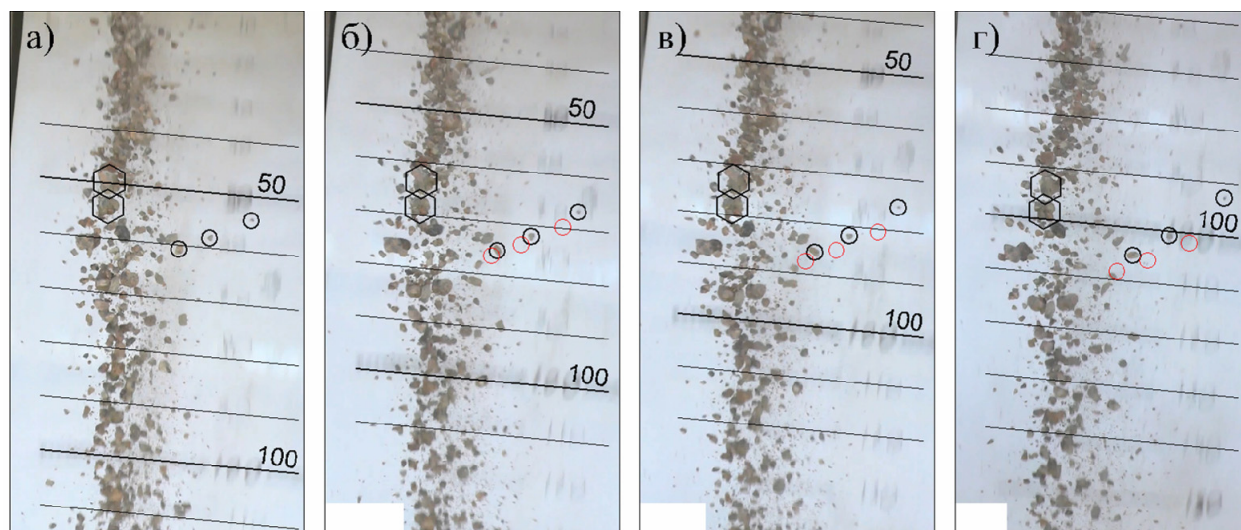


Рисунок 4 – Анализ динамики частиц в потоке:

а – расстояние падения 67 см; б – расстояние падения 83 см;
в – расстояние падения 94 см; г – расстояние падения 115 см

В результате анализа видеозаписей и отдельных кадров удалось установить, что скорость падения частиц в произвольном сечении струи зависит от расстояния частицы до условного центра потока, причем, чем ближе частицы к ядру потока, тем ближе их скорость к равноускоренной (рисунок 4, обведено окружностями). Это связано с уменьшением сил аэродинамического сопротивления вследствие уменьшения относительной скорости частиц и эжектируемого ими воздуха. Так же частицы активно влияют на динамику движения друг друга. Частицы, двигающиеся в потоке, одна за другой попадают в аэродинамическую тень и двигаются с ускорением, равным ускорению первой частицы (рисунок 4, обведено шестигранниками).

При малых объемных концентрациях $\beta < 0,01$, предположение об отсутствии влияния частиц друг на друга верно.

Для подтверждения вероятностно-статистической теории, с помощью ситового разделения из трёх фракций крупностью 0,94 мм, 3,75 мм, 15 мм, формировались образцы сыпучего материала с заданной дисперсностью (таблица 1, рисунок 5). Как известно, наибольшую эжектирующую способность имеет материал со средним диаметром $d_{cp} = 2,5$ мм. Комбинируя долю каждой фракции, получены образцы материала с различными гранулометрическими составами, но со средним диаметром, как равным 2,5 мм, (что соответствует мелкозернистым материалам), так и с большим или меньшим значением.

Таблица 1

Гранулометрические составы образцов материала

Образец №	Тип материала	Массовые доли классов, %			Среднемассовый диаметр d, мм	Класс материала
		1,85 мм	3,75 мм	7,5 мм		
№ 1	Полифракционный	66	34	0	2,51	мелкозернистый
№ 2	Полифракционный	76	19	5	2,51	мелкозернистый
№ 3	Полифракционный	88	1	11	2,51	мелкозернистый
№ 4	Монофракционный	100	0	0	1,88	мелкозернистый
№ 5	Монофракционный	0	100	0	3,75	кусовой
№ 6	Монофракционный	0	0	100	7,5	кусовой

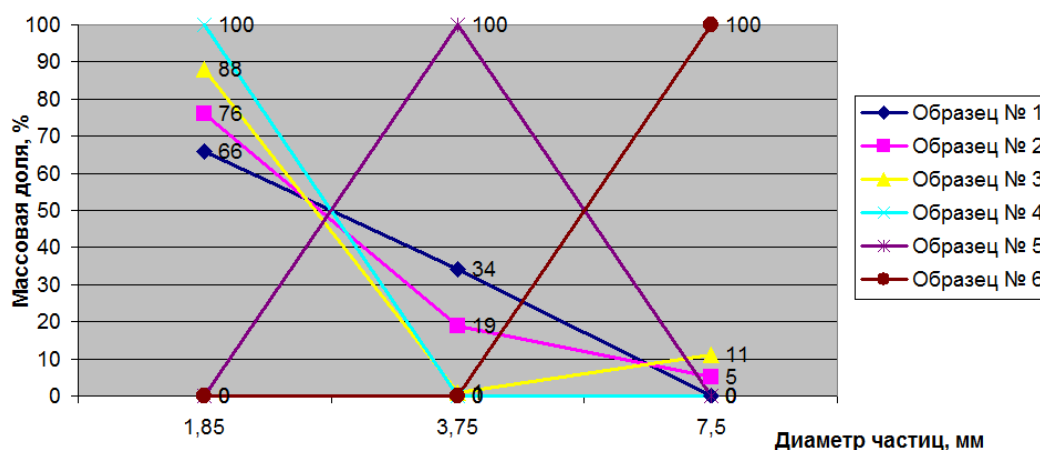


Рисунок 5 – Гранулометрические составы образцов материала

Для количественного определения расхода увлекаемого материалом воздуха экспериментальная установка была собрана в варианте Б (рисунок 6). Материал с заданным гранулометрическим составом высыпается из верхнего бункера 1 через тарированную диафрагму 2. Пройдя по желобу 3, материал вместе с увлекаемым воздухом пересыпается в камеру статического давления 4, создавая там избыточное (эжекционное) давление. Регулируя шибером 9 расход аспирируемого воздуха, устанавливалось равенство расхода удаляемого и поступающего, с материалом, воздуха.



Рисунок 6 – Схема экспериментального стенда (вариант Б):

- 1 – верхний бункер; 2 – шибер-диафрагма; 3 – выравнивающий желоб; 4 – камера статического давления;
- 5 – сменные апертуры; 6 – индикатор разрежения;
- 7 – пневмометрическая трубка; 8 – дифманометр;
- 9 – регулирующий шибер; 10 – вентилятор; 11 – рама

При одинаковом среднем диаметре d_{cp} , но различном гранулометрическом составе (материалы 1-3) расход увлекаемого материалом воздуха, для каждого состава различный, он увеличивается с ростом счетного количества частиц (рисунок 7). Аналогичная закономерность наблюдается и для монофракционных составов (рисунок 8).

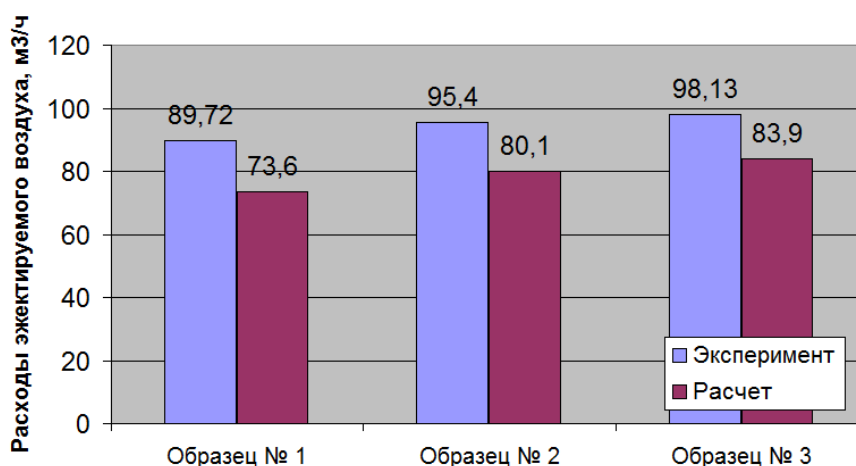


Рисунок 7 – Сравнение расчетных и экспериментальных расходов эжектируемого воздуха для полифракционных материалов

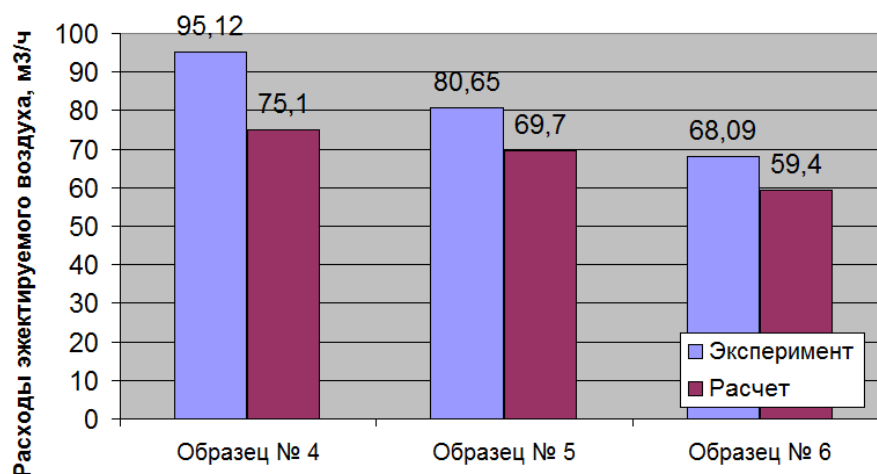


Рисунок 8 – Сравнение расчетных и экспериментальных расходов эжектируемого воздуха для монофракционных материалов

Установлено, что расхождение между расчетными значениями объемов аспирационного воздуха по предложенной вероятностно-статистической модели и значениями, полученными в ходе проведения лабораторного эксперимента, составляет не более 18 %.

Из сравнения расчётных коэффициентов лобового сопротивления с экспериментальными данными для шарообразных частиц – стальных шаров и водяных капель при $Re = 3500 - 4650$, полученными И.Н. Логачевым (таблица 2) так же следует вывод об их высокой тесноте связи (коэффициент линейной корреляции Пирсона равен $0,998 \pm 0,01$), достоверности и адекватности расчётных значений (критерий достоверности Стьюдента равен $0,13$, критерий адекватности Фишера равен $1,31$).

Таблица 2

Аэродинамические сопротивления различных фракций сыпучего материала

G , кг/с	Общая высота падения, м	Усредненная концентрация частиц, $\beta \cdot 10^3$	Коэффициент лобового сопротивления		
			Экспериментальный, ψ_s	расчетный, ψ_p	Погрешность, %
Стальные шары ($d_e = 12,8$ мм)					
1,51	3,8	1,79	0,39	0,398	+2,05
1,86	4,15	2,13	0,39	0,397	+1,79
2,25	3,8	2,66	0,4	0,397	-0,75
Водяные капли ($d_e = 3$ мм)					
0,095	2,0	0,46	0,57	0,549	-3,68
0,116	2,0	0,56	0,56	0,549	-1,96
0,125	2,0	0,61	0,57	0,549	-3,68

Как видно из таблицы 2, расчетный коэффициент лобового сопротивления шарообразных частиц ψ_p одинакового размера для усредненной объемной концентрации $\beta_y = (0,46 \dots 2,66) \cdot 10^{-3}$ и $d_e = 3 \dots 12,8$ мм удовлетворительно согласуются с экспериментально найденной величиной этого коэффициента ψ_s .

3. Выявлены закономерности влияния геометрических параметров бункеров и узлов загрузок бункеров на производительность систем местной вытяжной вентиляции.

При загрузках бункеров больших размеров, например бункеров силосного типа, высота падения загружаемого материала может превышать 10 м. При падении материала по всей высоте бункера происходит увлечение воздуха потоком сыпучего материала, что приводит к увеличению расхода эжекционного воздуха Q_3 по сравнению с начальным количеством Q_0 , поступающим через загрузочный желоб (рисунок 9).

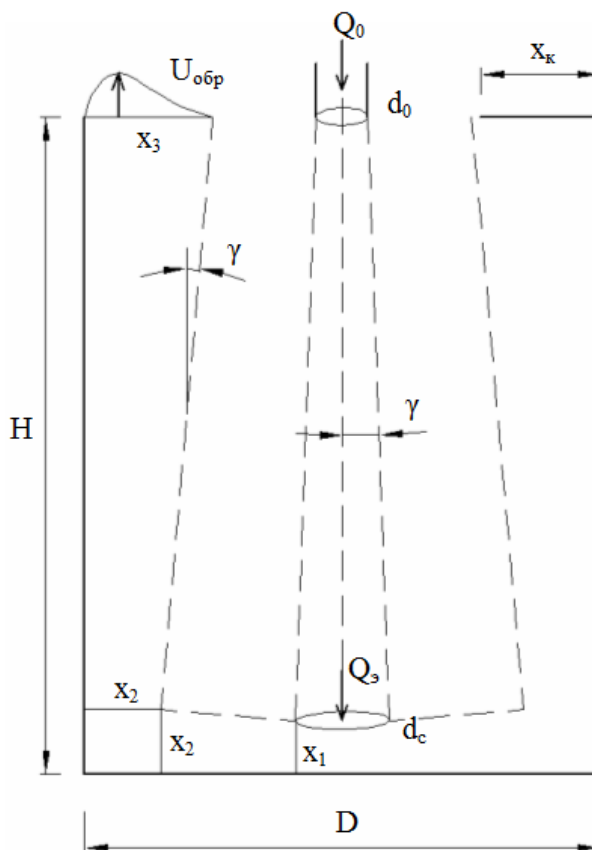


Рисунок 9 – Расчетная схема движения воздушных масс внутри бункера

В результате натекания эжекционной струи воздуха на дно бункера возникает настилающая воздушная струя,двигающаяся вдоль дна (конуса материала), а затем вдоль стенок, поднимаясь вверх.

Для определения минимально необходимой скорости воздуха, подсосываемой через загрузочные проемы, обеспечивающей отсутствие выбивания восходящей струи эжектированного воздуха, необходимо определить максимальную скорость восходящего обратного потока воздуха $U_{обр}$.

Зная диаметр падающего потока d_c найдем начальную толщину x_1 воздушной струи увлекаемого воздуха, настилающейся на дно (или насыпь материала) и характерные толщины x_2 и x_3 полуограниченной струи, настилающейся на боковую поверхность бункера:

$$x_1 = d_0/2; x_2 = x_1 + D/2 \cdot \operatorname{tg} \gamma; x_3 = x_2 + H \cdot \operatorname{tg} \gamma.$$

Скорость обратной струи определяется с учетом коэффициента затухания

$$m: U_{обр} \leq u_x = \frac{m}{x^\beta} u_0.$$

Расход воздуха в сечении x_2 определялся по формуле Н.Н. Садовской для струи в ограниченном пространстве (тупике): $L_{x_2} = 0,258 \cdot Q_3 \cdot 2 \cdot \sqrt{S_n/d_c}$.

Максимальная скорость воздушного течения в сечении x_3 :

$$U_{обр} = 1,2 \cdot v_{x_2} / \sqrt{\frac{0,06 \cdot H}{x_2} + 0,41}. \quad (13)$$

Численное решения уравнения (13) в программном комплексе Microsoft Excel показало, что скорость обратного потока зависит главным образом от высоты бункера H (рисунок 10). С уменьшением этой высоты (увеличением высо-

ты, наполняющего бункер материала) скорость $U_{обр}$ увеличивается. Искомый объёмный расход аспирируемого воздуха равен произведению данной скорости на площадь неплотностей или загрузочных проёмов бункера. В то же время, скорость $U_{обр}$ слабо зависит от диаметра бункера D .

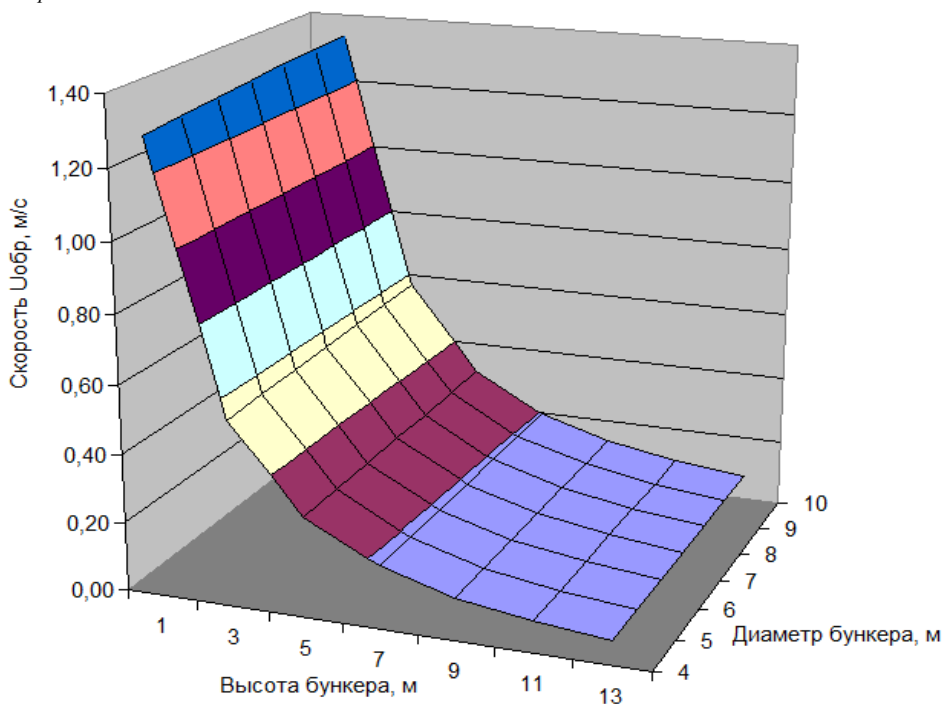


Рисунок 10 – Зависимость скорости восходящих потоков воздуха от диаметра и высоты бункера

4. Разработан способ снижения расхода эжекционной струи воздуха в полостях бункеров силосного типа и уменьшения массового расхода пылевых выбросов, выбиваемых из проёмов, за счет организации рециркуляционных воздушных течений.

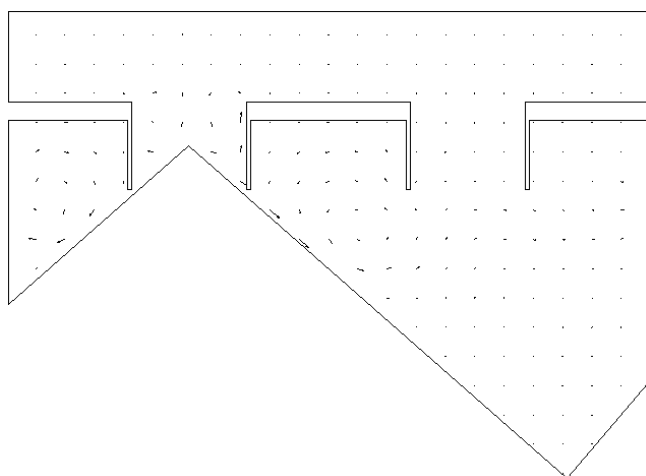


Рисунок 11 – Моделирование экранов в загрузочных проемах бункера:
1 – рабочий загрузочный проем; 2 – холостой загрузочный проем; 3 – экраны; 4 – насыпь материала

В результате имитационного моделирования накопительных бункеров корпуса дробления СГОКа (отм. +28 м) в среде SolidWorks (рисунки 11, 12) были найдены характеристики механических экранов, эффективно отражающих восходящие потоки воздуха, создаваемые эжекционным потоком.

Установка предложенных экранов отражателей на загрузочных проемах накопительных бункеров участка дробления КСМД (отм. +28,000) при неизменном

расходе воздуха системы обеспыливающей вентиляции привела к уменьшению концентраций пыли в воздухе рабочей зоны надбункерной галереи с 24,8 мг/м³ до 18,3 мг/м³.

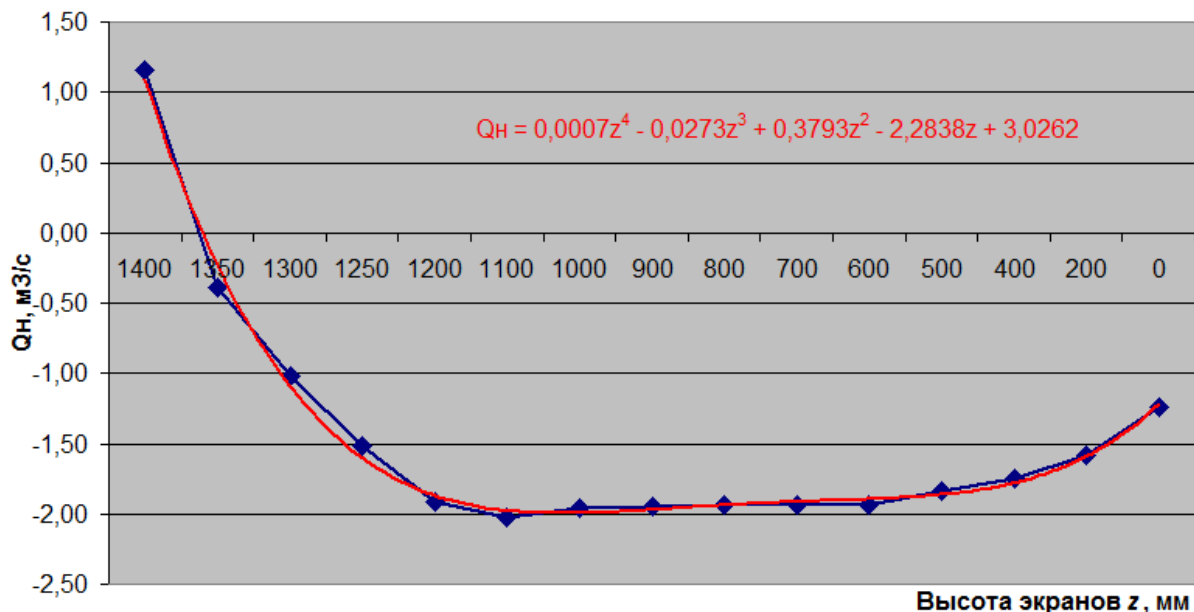


Рисунок 12 – Расходы выбиваемого из загрузочных проемов воздуха

Как видно из рисунка 12, установка аэродинамических экранов высотой $z < 1100$ мм при неизменном объеме аспирации существенно увеличивает защитный расход воздуха в загрузочных проемах. Резкое сокращение защитного расхода воздуха и его "опрокидывание" при высотах экранов от 1100 до 1400 мм связано с уменьшением расстояния между экраном и конусом насыпаемого материала. При этом весь эжектируемый струей воздух, вытесняясь в месте падения, отражается от самих экранов и вытекает обратно из загрузочного проема резко увеличивая запыленность воздуха в надбункерной галерее.

Таким образом, высоту аэродинамического экрана следует принимать наибольшей из конструктивно целесообразных, ограничивая при этом наполнение бункера таким образом, чтобы всегда оставался зазор между материалом и экраном не менее 300 мм.

Так же было рассмотрено уменьшение площади загрузочных проемов за счет козырьков длиной l_k , размещенных на передвижных тележках (таблица 3, рисунок 13). Разница расходов составляет 1,4 %. Наблюдается увеличение скорости на холостом загрузочном проёме на 19 %.

Таблица 3

Расчётные расходы воздуха

	Расход воздуха в загрузочных проемах Q_n , м³/с	
	желоб с козырьком $l_k = 2$ м	желоб без козырька
рабочий загрузочный проем	-2,095	-2,276
холостой загрузочный проем	-0,740	-0,599
суммарный расход	-2,835	-2,875

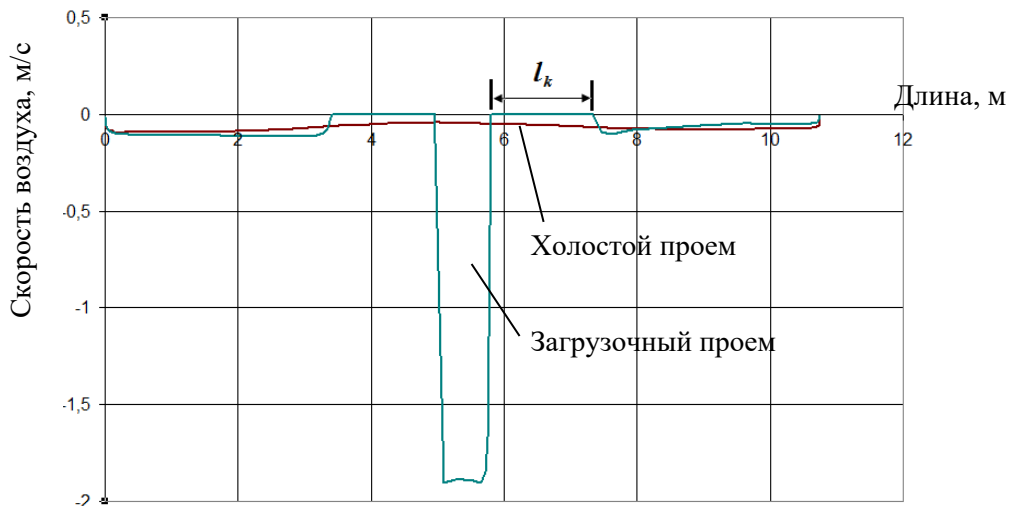


Рисунок 13 – Скорости воздуха в загрузочных проемах бункера при наличии козырька на загрузочной тележке: l_k – длина козырька

Применение козырьков на загрузочных тележках может быть достаточно эффективным только при существенном сокращении площадей загрузочных проемов, однако применение экранов на всей протяженности проемов позволит уменьшить пылевые выбросы в рабочую зону до 26 % при тех же энергозатратах.

5. Предложена методика расчета объёмного расхода аспирируемого воздуха, учитывающая влияние полидисперсности перегружаемого материала.

Методика расчета объёмного расхода аспирируемого воздуха (рисунок 14) базируется на уравнении воздушного баланса: $Q_a = Q_n + Q_{ж} + Q_m$, где Q_n – расход воздуха, поступающий через загрузочные проёмы, m^3/c ; $Q_{ж}$ – расход воздуха поступающего в бункер по загрузочному жёлобу, m^3/c ; Q_m – расход воздуха, вытесняемого поступающим материалом, m^3/c .

Расход воздуха, поступающего в бункер по загрузочному жёлобу (пункт 3, рисунка 14) определяется по известным методикам расчета конвейерных перегрузок:

$$Q_3 = \varphi \cdot v_k \cdot S_{стр} \cdot (1 - \beta)^2, \quad (14)$$

где $S_{стр}$ – площадь поперечного сечения струи, m^2 ; $v_k = \sqrt{2 \cdot g \cdot x}$ – скорость потока перегружаемого материала, m/c при касании дна; $\varphi = u / v_k$ – коэффициент скольжения компонентов (коэффициент эжекции); u – скорость эжектируемого воздуха, m/c .

Коэффициент скольжения компонентов зависит от числа Бутакова–Нейкова для потока частиц $Bu = 1,5 \cdot \psi \cdot \frac{v_k \cdot G}{g \cdot d_{cp} \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot S_{стр}}$. (15)

Коэффициент лобового сопротивления частиц определяется из выражения (9), коэффициент скольжения компонентов определяется методом последовательных приближений по формуле:

$$\varphi = \sqrt{Bu/3 \cdot \left[|1 - \varphi|^3 - |n - \varphi|^3 \right]}. \quad (16)$$

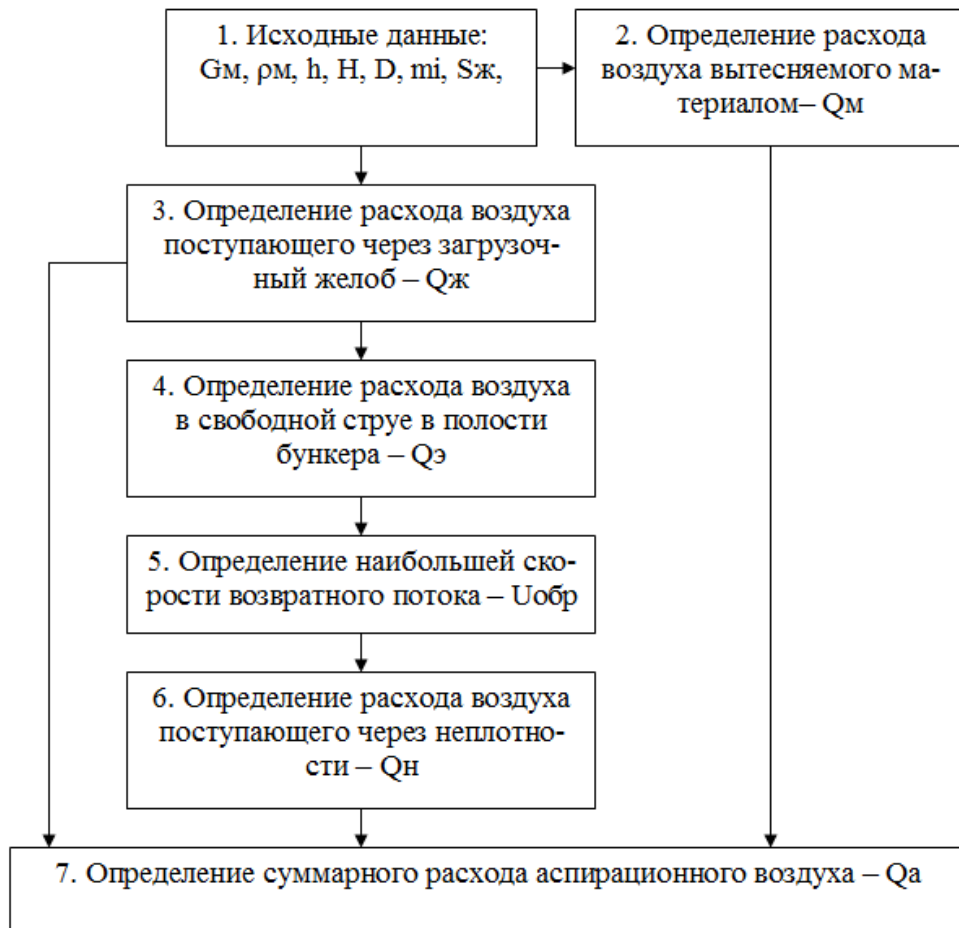


Рисунок 14 – Схема расчета объемов аспирации при загрузке бункеров силосного типа полифракционным материалом

Скорость, а затем расход воздуха в свободной струе в полости бункера (пункт 4, рисунка 14) определяется при помощи численного решения дифференциального уравнения:

$$\frac{du}{dx} = \frac{1}{1-\beta} \left(\frac{S_a}{\rho} - \frac{Gg}{S\rho_p (2gx + v_0^2)^{3/2}} \right). \quad (17)$$

Расход воздуха, поступающего в бункер через загрузочные проемы Q_n , зависит от площади проемов S_n и величины защитной скорости воздуха в них, не допускающей выбивание струй запыленного воздуха из бункера: $Q_n = U_{\max}^{обп} \cdot S_n$.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной диссертационной работе решена задача по совершенствованию метода расчета расхода воздуха, увлекаемого полифракционным сыпучим материалом, что позволит более точно определить производительность системы обеспыливающей вентиляции, а также снизить пылевые выбросы путем организации рециркуляционных воздушных течений в полостях загружаемых бункеров с открытыми загрузочными проемами.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены основные методы расчета производительности систем местной обеспыливающей вентиляции от перегрузочных узлов горноперерабатывающих комбинатов. Установлено, что актуальные на сегодняшний день методики или не учитывают дисперсные свойства материала, или разработаны с допущением монодисперсности перегружаемого материала, а гранулометрические свойства любых перегружаемых материалов описываются величиной условного среднего диаметра. Наиболее целесообразным направлением по совершенствованию методов расчета систем обеспыливающей вентиляции узлов загрузок бункеров является учет фракционного состава перегружаемого материала и геометрических характеристик бункеров.

2. Разработана математическая модель воздушного течения, увлекаемого полифракционным сыпучим материалом. Рассмотрено влияние фракционного состава перегружаемого материала, а также способов определения среднего диаметра частиц на расход эжектируемого воздуха и, как следствие, на расход воздуха обеспыливающей вентиляции и на пылевыведения в рабочую зону. Показано, что в силу особенностей гранулометрических составов продуктов горнорудной промышленности, применение одного лишь среднего диаметра для адекватного описания характеристик этих полифракционных материалов недостаточно.

3. Предложен вероятностно-статистический подход определения аэродинамического сопротивления множества падающих частиц различной дисперсности, который позволит отказаться от использования эмпирического коэффициента лобового сопротивления частицы в потоке ψ^* , определенного для случая движения материала в желобе.

4. При помощи экспериментальных исследований, проведенных на лабораторной установке, доказана зависимость расхода эжектируемого воздуха от гранулометрического состава перегружаемого материала. Определены скорость и расход эжекционного воздуха в свободном потоке падающего материала при различных параметрах перегружаемого потока.

5. Экспериментально уточнены численные значения коэффициентов, принимаемых в вероятностном подходе. Коэффициент пропорциональности K , характеризующий относительную величину аэродинамической тени следует принимать не менее $K = 15$ в диапазоне $K = 10 \div 60$. Аэродинамическое сопротивление частиц исследуемого материала в области автомодельности $\psi_0 = 1,128$.

6. Установлено, что расхождение между расчетными значениями объемов аспирационного воздуха по предложенной вероятностно-статистической модели, данными существующих производств, и значениями, полученными в ходе проведения лабораторного эксперимента, составляет не более 18 %.

7. Изготовлены и внедрены аэродинамические экраны для загрузочных проемов накопительных бункеров участка дробления КСМД (отм. +28,000) Стойленского ГОКа, г. Старый Оскол. Даны технологические рекомендации по предотвращению выбивания пылегазовых потоков из загрузочных проемов

в процессе наполнения бункеров сырьем. Применение экранов на всей протяженности проемов позволило уменьшить пылевые выбросы в рабочую зону на 26 % при тех же энергозатратах.

8. Обосновано значение защитной скорости воздуха в проемах на основе максимальной скорости возвратного пылегазового потока. Показана эффективность применения аэродинамических экранов на загрузочных проемах в диапазоне высот экрана от 0 до 1400 мм. Установлена недопустимость уменьшения зазора между материалом и экраном менее 300 мм.

9. Предложен алгоритм и программа, позволяющие численно получить значения расхода аспирируемого воздуха при загрузке бункеров с открытыми загрузочными проемами полифракционным материалом.

Благодаря полученным в работе результатам были даны **рекомендации** по рациональным размерам экранов-отражателей на загрузочных проемах бункеров, а также предложена методика расчета расходов обеспыливающей вентиляции при загрузке бункеров открытого типа.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в дальнейшем совершенствовании систем обеспыливающей вентиляции, за счет развития методов их расчёта и использования рециркуляционных воздушных течений.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Монография

1. Обеспыливающая вентиляция: монография / В.А. Минко, И.Н. Логачев, К.И. Логачев, **Попов Е.Н.** и др.; под общ. ред. В.А. Минко. // Белгород: изд-во БГТУ, 2010. – 565 с.

Статьи в рецензируемых научных журналах согласно Перечню ВАК

2. **Попов Е.Н.**, Перемещение пылевых частиц в падающем потоке полифракционного материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, №2, 2018. С. 34-38.

3. **Попов Е.Н.**, Исследование эжектирующих свойств потока полифракционного сыпучего материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, №3, 2018. С. 46-52.

4. Логачев И.Н., **Попов Е.Н.**, Вероятностно-статистический подход к описанию аэродинамического взаимодействия коллектива падающих частиц с воздухом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, №10, 2016. С. 120-124.

5. Логачев И.Н., **Попов Е.Н.**, Вероятностно-статистический подход к описанию аэродинамического взаимодействия коллектива падающих частиц с воздухом: случай полифракционного материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, №12, 2016. С. 95-100.

6. Семиненко А.С., Малахов Д.Ю., **Попов Е.Н.**, Алифанова А.И. Учет влияния градиента давления в интегральной модели описания присоединенных струй // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-1. С. 52-54.

Статья, проиндексированная в Scopus

7. Logachev I.N., Minko V.A., **Popov E.N.**, Determination of the aerodynamic drag factor of the incident particles of a multifractional material // International Journal of Pharmacy & Technology: Volume 8, Issue 4, December 2016, Pages 22555-22566.

Объекты интеллектуальной собственности

8. Пат. на п.м. 97438 Российская Федерация: МПК E21F5/00. Аспирационное укрытие мест перегрузки сыпучего материала / Киреев В.М., Минко В.А., Логачев И.Н., Феоктистов А.Ю., Староверов С.В., Гольцов А.Б., Семиненко А.С. **Попов Е.Н.**; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". No.2010114489/03, заяв. 12.04.2010; опубл. 10.09.2010.

9. Пат. на п.м. 97168 Российская Федерация: МПК B65G69/18. Аспирационное укрытие мест перегрузки сыпучего материала / Киреев В.М., Минко В.А., Логачев И.Н., Феоктистов А.Ю., Староверов С.В., Гольцов А.Б., Семиненко А.С. **Попов Е.Н.**; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". No. 2010143830/11, заяв. 26.10.2010; опубл. 10.03.2011.

10. Пат. на п.м. 142259 Российская Федерация: МПК E21F 5/00. Аспирационное укрытие мест перегрузки сыпучего материала / Семиненко А.С., Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Алифанова А.И., Киреев В.И., **Попов Е.Н.**, Гольцов А.Б.; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". Заявл. 2014105607/03, 14.02.2014 Опубл.: 27.06.2014 Бюл. № 18.

11. Пат. на п.м. 45186 РФ Батарейный манометр / Минко В.А., Логачев И.Н., Овсянников Ю.Г., **Попов Е.Н.**; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" опубл. 2005, бюлл. №12.

В других изданиях

12. Семиненко А.С., **Попов Е.Н.**, Оптимизация системы аспирации цементных силосов // Современные проблемы науки образования и производства: Сборник научных трудов II Междунар. науч.-практ. конф., Нижний Новгород, 16 апр. 2010: НФ УРАО, 2010 – С. 465-468.

13. Семиненко А.С., **Попов Е.Н.**, К обеспыливанию бункеров // Современные проблемы науки образования и производства: сб. науч. тр. / Нижний Новгород: НФ УРАО, 2010 – С. 468-471.

14. Семиненко А.С., **Попов Е.Н.**, Определение объемов аспирационного воздуха при обеспыливании бункеров // Наука и молодежь в начале нового столетия: Материалы III Международной науч.-практ. конф. / Губкин: ИП Уваров В.М., 2010. - С.71-75.

15. Логачев А.К., Крюков И.В., **Попов Е.Н.**, Семиненко А.С., Крюкова О.С. Математическое моделирование процессов аспирации и разработка научных основ создания энергоэффективных систем локализации пылегазовых выделений // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, прово-

димого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области: сборник докладов / Белгор. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – С. 170-179.

Список основных сокращений и условных обозначений

v, V_i – скорость частиц, частиц i -й фракции м/с;

$u, U_{обр}$ – скорость воздуха, скорость воздуха, выбивающегося из загрузочных проемов м/с;

β, β_i – объемная концентрация частиц, частиц диаметром d_i ;

ψ, ψ_0, ψ^* – коэффициент сопротивления одиночной частицы, частицы в области автономности, частицы в потоке материала;

G, G_i – массовый расход частиц, частиц i -й фракции, кг/с;

$P(T)$ – вероятность нахождения частицы в аэродинамической тени частиц;

$P(A)$ – вероятность активного воздействия частиц на воздух;

S_a – сумма аэродинамических сил всех частиц полифракционного материала в единице объема потока этих частиц, Н/м³.

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 16.04.2018. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 32.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, ул. Егорова, д. 5/8, лит. А.