

На правах рукописи



СЕМИНЕНКО АРТЕМ СЕРГЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ
ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОМ СКЛАДИРОВАНИИ
ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

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;

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

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»**

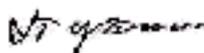
Защита диссертации состоится 26 июня 2018 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (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/seminenko-artem-sergeevich>.

Автореферат разослан 14 мая 2018 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



Пужкал Виктор Алексеевич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В процессе перегрузок порошкообразных материалов (цемент; полевой шпат; металлическая пыль; известь; шлак; доломит; кальцит; зола; литейный песок и т. п.) возникают пылевые выбросы, наносящие значительный вред окружающей среде и человеку. С целью минимизации пылевых выбросов в атмосферу используют системы пневматического транспортирования, бункера для хранения материала и системы вентиляции для улавливания пылевых частиц.

При пневмотранспортировании материал изолирован от рабочей среды, тем самым обеспечивается беспыльность транспортировки. Загрузка должна производиться в герметичные емкости, оснащенные системой обеспыливающей вентиляции. При этом нагрузка на систему обеспыливания увеличивается, вследствие высокой скорости транспортирования потока сыпучего материала, по сравнению с другими способами транспортировки.

Снижению нагрузки и повышению эффективности системы обеспыливающей вентиляции способствует снижение концентрации материала в аспирационном воздухе. Этого можно достичь путем организации воздушных потоков в полости бункера за счет модернизации узла загрузки. В настоящее время не уделяется должного внимания конструированию загрузочных узлов бункеров, которые с высокой степенью эффективности могут выполнять дополнительные функции, в том числе сепарационную и обеспыливающую. В частности, снижение скорости запылённого воздушного потока в загрузочном узле может привести к значительному повышению эффективности системы обеспыливающей вентиляции.

Поэтому актуальной научно-технической задачей является разработка узла загрузки порошкообразными сыпучими материалами бункеров, обеспечивающего повышение эффективности систем обеспыливающей вентиляции.

Данное диссертационное исследование выполнялось в рамках научных проектов: грант РФФИ № 14-41-18005 р_офи_м «Математическое моделирование процессов аспирации и разработка научных основ создания энергоэффективных систем локализации пылегазовых выделений»; грант РФФИ № 16-08-00074а «Моделирование закрученных потоков в системах аспирации», грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-588.2012.8 «Разработка методов пыле- и газоулавливания в пыльных цехах промышленных предприятий»; НИР «Разработка методик расчета систем обеспыливания и исследование условий загрузки бункеров с учетом дисперсности материалов» в рамках реализации мероприятий Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012-2016 годы; НИР «Разработка энергоэффективных систем аспирации цементных складов силосного типа» в рамках реализации Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2017-2021 годы.

Степень разработанности темы исследования.

Теоретической базой исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых – Азарова В.Н, Богуславского Е.И., Боровкова Д.П., Вальдберга А.Ю., Василевского В.М., Гримитлина А.М., Дацюк Т.А., Зиганшина М.Г., Коузова П.А., Красовицкого Ю.В., Ливчак И.Ф., Логачева И.Н., Нейкова О.Д.,

Минко В.А., Посохина В.Н., Сатарина В.И., Страус В., Уляшевой В.М., Штокмана Е.А., Anderson D.M., Nath T., Nemeon W.C.L., Jones M.G., Bianconi W.O.A., Wyruch P.W., Xiaochuan Li и др.

В частности, исследованиями процессов пылеобразования при падении сыпучего материала посвящены труды Беспалова В.И., Бобровникова Н.А., Константинова А.Ф., Ларина Ю.А., Логачева И.Н., Минко В.А., Самсонова В.Т., Семенова А.М., Сервацка З. Исследованиями коандовских течений занимались Bevilaqua P.M., Bourque C., Bradshaw P., Carpenter P.W., Cornelius K.C., Fekete G.I., Gilchrist A. R., Giles J. A., Gregory-Smith D.G., Guitton D.E., Juvet P.J.D., Neuendorf R., Newman V.G., Patankar U.M., Rask R.V., Акатнов Н.И., Ганич Г.А., Гиневский А.С., Жулев Ю.Г., Квашнин И.М., Соколова И. Н.

Исследования коандовских воздушных течений в условиях загрузки бункеров, их влияние на пылеобразование при пневмотранспортной загрузке, а также на эффективность систем вентиляции не производились ни теоретически, ни экспериментально.

Цель работы – совершенствование конструкции узла пневмотранспортной загрузки бункеров порошкообразными материалами для повышения эффективности системы вентиляции.

Для достижения цели в работе поставлены следующие **задачи**:

- провести анализ существующих систем обеспыливания бункеров, конструктивного оформления загрузочных узлов, методики подбора основных элементов систем обеспыливающей вентиляции;
- провести анализ условий пылеобразования при загрузке бункеров порошкообразными материалами, определить возможность повышения эффективности систем вентиляции за счет снижения концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе;
- разработать и экспериментально доказать работоспособность конструкции узла пневмотранспортной загрузки бункера, обеспечивающего снижение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе;
- разработать математическую модель воздушного течения в загрузочном узле бункера, регрессионные уравнения, установить степень их достоверности и адекватности, определить рациональные режимы работы устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов;
- провести опытно-промышленные испытания и экономическую оценку эффективности предлагаемого технического решения.

Объект исследования – загрузочное устройство бункеров порошкообразными материалами.

Предмет исследования – воздушно-струйные течения формируемые в узле загрузки бункеров и условия возникновения эффекта Коанда.

Научную новизну работы составляют:

- аналитические выражения для расчета поля скоростей воздуха при различных вариантах узлов пневмотранспортной загрузки в бункерах;
- результаты численных расчетов, доказывающих возможность снижения эффекта эрозии складированного сыпучего материала в бункере и соответственно пылеуноса в вентиляционную сеть, при использовании загрузочного устройства, формирующего веерную воздушную струю;

- новая конструкция узла загрузки бункеров, позволяющая снизить пылеобразование при пневмотранспортной загрузке сыпучих материалов, работоспособность которого подтверждена экспериментальным путем;
- конструктивно-технологические параметры разработанного устройства, обеспечивающие формирование коандовского течения;
- уравнения регрессии, позволяющие определить конструктивно-режимные характеристики устройства, рекомендуемые к использованию в методике расчета вентиляции бункеров при пневмотранспортной загрузке порошкообразными материалами.

Методология и методы исследования. Работа выполнена с применением патентно-информационного анализа технических решений в исследуемой области, а также аналитического обобщения известных научных и технических результатов, методов математического моделирования, планирования эксперимента и статистической обработки данных, экспериментальных методов: численных, лабораторных, промышленных. Теоретической и методологической базой диссертационной работы являются законы и методы теории струй, пограничного слоя и классической аэродинамики.

Специальность, которой соответствует диссертация. Согласно сформулированной цели научной работы, ее научной новизне, установленной практической значимости, диссертация соответствует паспорту специальности 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение, пункту 1 «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии»; пункту 3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума».

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в создании новой системы вентиляции бункеров, включающей устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов. Новизна конструктивного решения защищена патентом РФ на полезную модель.

Предложенные теоретические модели, конструктивные решения, методика расчета и рекомендации по подбору рациональных рабочих режимов узлов загрузки могут быть использованы при расчете и проектировании систем вентиляции бункеров при пневмотранспортной загрузке порошкообразных материалов, что будет способствовать повышению эффективности и надежности работы систем вентиляции, сбережению энергетических и производственных ресурсов, улучшению экологической ситуации на рабочих местах.

Положения, выносимые на защиту:

- аналитические выражения для расчета поля скоростей воздуха при различных вариантах узлов пневмотранспортной загрузки в бункера;
- графическое решение аналитических выражений полей скоростей доказывающих, что для снижения эффекта эрозии складированного сыпучего материала в бункере и, соответственно, пылеуноса в аспирационную сеть необходимо

использовать кольцевое загрузочное устройство и истекающую из него веерную воздушную струю;

- новая конструкция узла загрузки бункера, позволяющая снизить пылеобразование при пневмотранспортной загрузке сыпучих материалов;

- результаты экспериментальных исследований определения конструктивно-эксплуатационных параметров узла загрузки бункера, способствующих формированию коандовских течений;

- уравнения регрессии, позволяющие определить конструктивно-режимные характеристики узла загрузки бункера, обеспечивающих снижение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе и рекомендуемые к использованию в методике расчета вентиляции бункеров;

- результаты промышленных испытаний и технико-экономической оценки работы предлагаемых систем вентиляции.

Степень достоверности и апробация работы.

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием фундаментальных методов теории пограничного слоя и аэродинамики для разработки математических моделей; использованием оборудования и измерительных приборов, обеспечивающих достаточную точность измерения; математическими методами планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных, а также обсуждением на научных конференциях методов и результатов исследования с последующей их публикацией. Получение положительных результатов апробации предлагаемых решений в системах аспирации цементных силосов ЗАО «Белгородский цемент», при разработке проекта систем аспирации цеха водосодержащих эмульсий филиала ООО «Тиккурила».

Основные положения и результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2005–2016 гг.), 1-м Международном форуме Актуальные проблемы современной науки (Самара, СГАСА, 2005), Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы технического естественно-научного и гуманитарного знания» (Губкин, 2007 г.), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь в начале нового столетия» (Губкин, 2008, 2011, 2015 гг.), II Международной научно-практической конференции «Современные проблемы науки образования и производства» (Нижний Новгород: НФ УРАО, 2010 г.), Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям «Эврика» (Юж.-Рос. гос. ун-т. (НПИ), Новочеркасск, 2011 г.), Всероссийском конкурсе «Инновационный потенциал молодежи 2012» (Ульяновский государственный университет. Ульяновск, 2011 г.), Международной конференции «Экология и здоровье человека» (Маврикий, 2012 г.), Международной конференции «Perspective innovations in science, education, production and transport» (Одесса, 2013–2014 гг.), European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences (Vienna, Austria, 2014 г.), I Всероссийской научно-технической конферен-

ции, посвящённой памяти д-ра техн. наук, профессора, А. А. Сандера «Энергосбережение и энергоэффективность на промышленных предприятиях и в жилищно-коммунальном хозяйстве материалы» (Новосибирск, 2016 г.), региональной научно-технической конференции по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области (Белгород, 2017 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 31 печатной работе, из них 6 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, 4 патента на полезную модель и две монографии, изданные в соавторстве.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и 11 приложений. Работа содержит 191 страницу машинописного текста, 47 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 164 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследования, поставлены задачи исследования, характеризуется научная новизна и практическая значимость результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ актуальных направлений развития и совершенствования систем локализации пылевыведений при транспортировке, хранении и перегрузке порошковых материалов. В частности, рассмотрены различные технические решения систем аспирации и узлов загрузки, применяемых в промышленности строительных материалов. Проведен анализ методики расчета элементов системы аспирации, условий пылеобразования при перегрузках сыпучих материалов и закономерностей изменения направления воздушных струй, движущихся вдоль криволинейной поверхности.

Во второй главе разработана математическая модель динамики частиц в бункерах при пневмотранспортной загрузке; выявлены закономерности изменения поля скоростей воздуха, в зависимости от вида загрузочной струи и начальной скорости движения; траектории частиц в полости бункера при различных конструктивных исполнениях загрузочных патрубков. Произведено сравнение способности пылеобразования различных видов струй, формируемых при загрузке.

В третьей главе разработана конструкция устройства для снижения пылеобразования при загрузке материала, экспериментальная установка для проверки его работоспособности. Рассмотрены план, программа и методика экспериментального исследования условий реализации эффекта Коанда на разработанном устройстве. Изложены и сопоставлены результаты натурного и вычислительного экспериментов. Определены рациональные конструктивно-режимные параметры устройства для обеспечения эффективной работы системы вентиляции при пневмотранспортной загрузке порошкообразных материалов.

В четвертой главе разработаны: рекомендуемые схемы и конструктивные особенности систем вентиляции бункеров при пневмотранспортной загрузке; методика расчета рекомендуемых систем вентиляции. Представлены результаты

промышленных испытаний устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов; результаты экономического и экологического расчета применения рекомендуемых схем вентиляции бункеров при пневмотранспортной загрузке.

В заключении изложены основные итоги выполненных исследований, сформулированы полученные результаты и перспективы дальнейшей разработки темы.

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

1. Получены аналитические выражения для расчета поля скоростей воздуха при различных вариантах узлов пневмотранспортной загрузки.

Выражения для поля скоростей при истечении струй из загрузочного патрубка, расположенного в крышке бункера получены путем классического построения уравнений пограничного слоя из уравнений Навье-Стокса.

Для определения поля скоростей при истечении из круглого отверстия (осесимметричная струя-источник – рисунок 1), получены следующие выражения для относительных продольной \bar{u}_x , поперечной \bar{u}_y и окружной \bar{u}_φ скоростей:

$$\bar{u}_x = K_x \frac{F'(\eta)}{\bar{x}\eta}, \quad \bar{u}_y = K_y \frac{1}{\bar{y}} \left(\frac{7}{z} - \frac{1}{z^2} - 3 \right), \quad \bar{u}_\varphi = K_\varphi \frac{\Phi(\eta)}{(\bar{x})^2}. \quad (1)$$

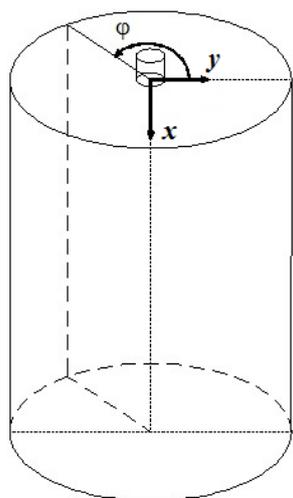


Рисунок 1 – Схема подачи осесимметричной струи в бункер

где d_0 – диаметр патрубка (начального сечения струи), м; u_{x0} – скорость воздуха на выходе из патрубка, м/с; a – экспериментальный коэффициент, учитывающий «турбулентную» структуру струи; \bar{x} , \bar{y} – безразмерные координаты:

$$\bar{x} = \frac{x}{d_0}, \quad \bar{y} = \frac{y}{d_0}; \quad (2)$$

K_x, K_y, K_φ – укрупненные коэффициенты:

$$K_x = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{3}{32}}, \quad K_y = \frac{2a}{3} \sqrt{\frac{3}{32}}, \quad K_\varphi = \frac{1}{24a^2} \sqrt{\frac{3}{32}}; \quad (3)$$

η – независимая переменная аффинных преобразований:

$$\eta = \frac{\bar{y}}{a\bar{x}}; \quad (4)$$

$F(\eta), \Phi(\eta)$ – функции аффинных преобразований:

$$\Phi(\eta) = \frac{\eta}{(z)^2}, \quad F'(\eta) = \frac{\eta}{(z)^2}, \quad z = 1 + \frac{1}{8}\eta^2. \quad (5)$$

При истечении струи из щелевидного отверстия (плоская струя) (см. рисунок 2), расчётные формулы примут вид:

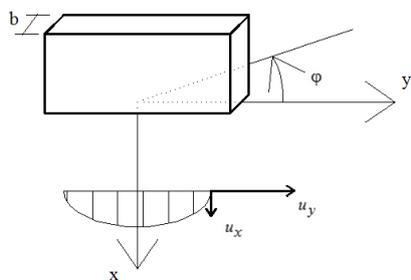


Рисунок 2 – Схема подачи плоской струи

$$\bar{u}_x = K_x \frac{1 - \text{th}^2 \eta}{\sqrt{\bar{x}}}, \quad \bar{u}_y = K_y \text{th} \eta \left(\frac{1}{2} - \text{th} \eta \right); \quad (6)$$

$$K_x = \sqrt{\frac{3}{4a}}, \quad K_y = \sqrt{\frac{3a}{4}} = aK_x; \quad (7)$$

где безразмерные координаты для плоской струи:

$$\bar{x} = x/b_0, \quad \bar{y} = y/b_0. \quad (8)$$

Для веерной струи (см. рисунок 3), выражения для расчета поля скоростей:

$$\bar{u}_x = \frac{K_x}{\bar{x} \text{ch}^2 \eta}; \quad \bar{u}_y = \frac{K_y}{\bar{x}} \frac{\eta - 0,5 \text{sh}(2\eta)}{\text{ch}^2 \eta}; \quad \bar{u}_\varphi = \frac{K_\varphi}{(\bar{x})^2} \frac{1}{\text{ch}^2 \eta}, \quad (9)$$

$$K_x = \frac{\sqrt{3\bar{r}_0}}{4a}, \quad K_y = \sqrt{\frac{3a\bar{r}_0}{4}} = aK_x, \quad K_\varphi = K_x \frac{\bar{r}_0}{\text{tg} \gamma}; \quad (10)$$

где r_0 – радиус кольцевой щели (расстояние от оси Oy до начального сечения струи), м; γ – угол наклона вектора скорости выхода.

2. В результате численных расчетов доказано, что для снижения контактного взаимодействия пылевоздушной струи и преграды (складированного материала), а соответственно пылеуноса в сеть вытяжной вентиляции необходимо использовать загрузочное устройство, формирующее веерную воздушную струю.

Процесс укладки порошкообразного материала (например, цемента) в бункере и закономерности его размещения по поперечному сечению в значительной степени определяются траекторией отдельных частиц. В данном случае она зависит от крупности частиц, и аэродинамического поля скоростей воздуха в полости бункера, а также начальных условий выпуска двухкомпонентной смеси «твердая частица – воздух» из разгрузочных патрубков пневмотранспортной системы.

На рисунке 4 показано графическое решение уравнений (1–10) в условиях загрузки цементных силосов системой пневмотранспорта при формировании различных типов струй в узлах загрузки. Характерными особенностями выпуска этой смеси являются значительная скорость компонентов (15–20 м/с) и струйный характер течения несущей среды – воздуха. Приведенные профили относительных скоростей струй соответствуют разной удаленности от крышки бункера x/d (d – диаметр круглого отверстия, из которого истекает струя), с шагом в 34 калибра, при начальном отношении равном 10, где автомодельное течение достаточно точно описывается соотношениями (1–10).

На рисунке 5 представлен объединенный график изменения осевой скорости различных струй. На расстоянии до 100 калибров скорость веерной струи значительно меньше, чем у осесимметричной и плоской струй, что характеризует снижение пылеобразования складированного материала при контакте струи с материалом.

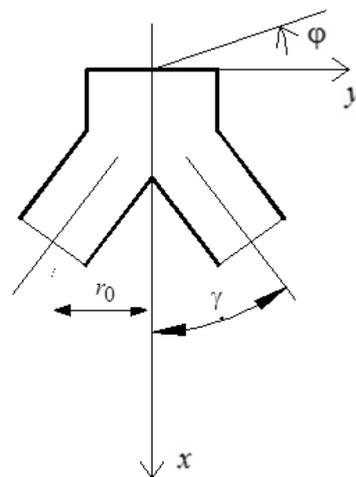


Рисунок 3 – Схема формирования веерной струи

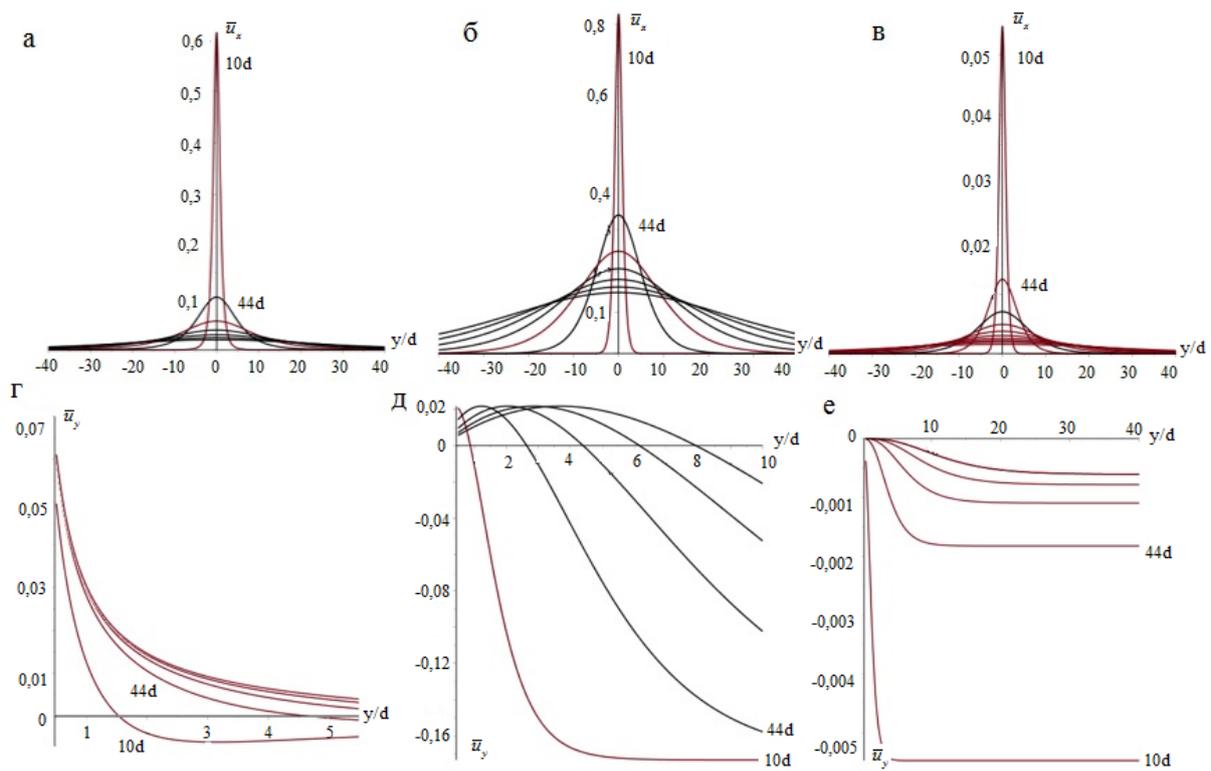


Рисунок 4 – Профили составляющих скорости струй, истекающих из узла загрузки бункера:
а – осевая составляющая осесимметричной струи, б – осевая составляющая плоской струи,
в – осевая составляющая веерной струи, г – поперечная составляющая осесимметричной струи,
д – поперечная составляющая плоской струи, е – поперечная составляющая веерной струи

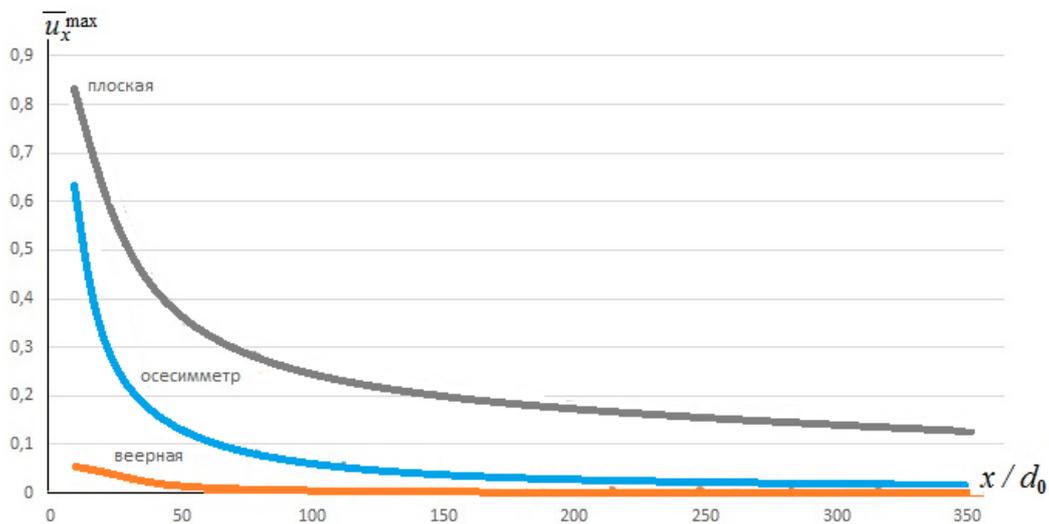


Рисунок 5 – Изменение осевой скорости струи при удалении от узла загрузки

Для построения траекторий движения частиц использовалась следующая система обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_4, \quad \dot{x}_2 = x_5, \quad \dot{x}_3 = x_6, \\ \dot{x}_4 = Fr + \frac{1}{St} \left(\frac{u_x}{u_\infty} - x_4 \right), \\ \dot{x}_5 = x_2 x_6^2 + \frac{1}{St} \left(\frac{u_y}{u_\infty} - x_5 \right), \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{x_2} \left(-2x_2 x_6 + \frac{1}{St} \left(\frac{u_\varphi}{u_\infty} - x_2 x_6 \right) \right); \end{cases} \quad (11)$$

где безразмерные величины определяются по формулам:

$$x_1 = \frac{x}{l_\infty}, \quad x_2 = \frac{y}{l_\infty}, \quad x_3 = \varphi, \quad x_4 = \frac{v_x}{u_\infty}, \quad x_5 = \frac{v_y}{u_\infty}, \quad x_6 = \frac{d\varphi}{dt} \tau_\infty, \quad \tau = \frac{t}{l_\infty} u_\infty; \quad (12)$$

$\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, \dot{x}_5, \dot{x}_6$ – производные по безразмерной величине τ_∞ ;

Fr – число Фруда, учитывающее действие сил тяжести:

$$Fr = \frac{g l_\infty}{u_\infty^2}; \quad (13)$$

St – число Стокса, учитывающее действие аэродинамических сил:

$$St = \frac{u_\infty}{k l_\infty} = \frac{d_p^2 \rho_p u_\infty}{18 \mu l_\infty}; \quad (14)$$

l_∞ – характерная длина, u_∞ – скорость произвольной системы базовых параметров.

Начальные скорости вылета частиц материала из узла загрузки бункера принимались однородными, составляющие скорости при отрыве прилипших частиц с поверхности патрубка приравнивались нулю. Поле скоростей описывалось системами уравнений (1), (6) или (9), в зависимости от вида воздушных струй, создаваемых при загрузке.

С использованием приведенных соотношений и уравнений в среде универсальной математической среды Maple составлена программа расчета траекторий частиц в веерной струе. Из представленных траекторий на рисунке 6 следует, что частицы материала оседают по криволинейной траектории и складываются в бункере. В отличие от случая осесимметричной струи (при вертикальном падении частиц) наблюдается снижение ударного взаимодействия частиц, а соответственно и вторичное пылеобразование.

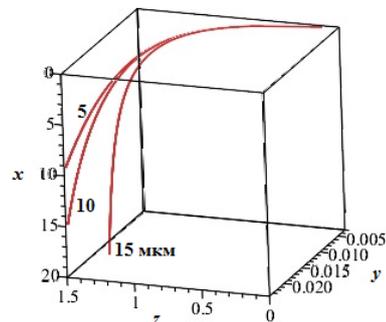


Рисунок 6 – траектории пылевых частиц диаметрами 5, 10, 15 мкм в веерной струе

3. Разработана новая конструкция узла загрузки бункеров, позволяющая снизить пылеобразование при пневмотранспортной загрузке сыпучих материалов. При помощи натурального эксперимента подтверждена работоспособность предложенного технического решения.

Предлагаемое запатентованное устройство (рисунок 7) состоит из трубопровода 1 пневмотранспорта с соплом 2, образованным тором 3 жестко закрепленным на нижней части трубопровода 1 и расположенного на одной с тором 3 вертикальной оси конусом 4, обращенным вершиной вверх.

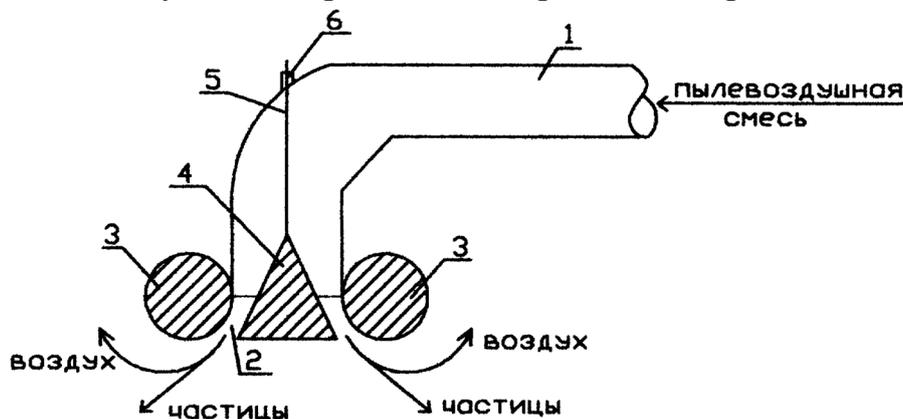


Рисунок 7 – Устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов

Вершина конуса 4 связана с трубопроводом с возможностью вертикального перемещения, при помощи стержня 5, закрепленного на вершине конуса 4 с одной стороны и контргайкой 6 на трубопроводе 1 с другой. Такое закрепление стержня 5 обеспечивает кроме вертикального перемещения конуса 4 еще и неподвижное его закрепление.

Сопло, ограниченное тором и конусом формирует коандовское течение. Струя воздуха, вытекая из сопла, увлекает окружающий воздух, поверхность тора препятствует свободному поступлению воздуха с одной стороны струи, способствуя понижению давления у поверхности тора и «прилипанию» к ней струи воздуха. Таким образом, обеспечивается не только снижение уноса частиц системой пылеочистки, но и уменьшение «раздувания» и пылеобразования загруженного материала.

Для исследования динамики воздушных потоков, создаваемых устройством по снижению пылеобразования при загрузке сыпучих веществ и проверки создания веерных струй была разработана экспериментальная установка (рисунок 8).

С помощью термоанемометра TESTO 425 производились замеры скорости воздушной струи, формируемой рассматриваемым устройством, состоящего из подающего патрубка с тороидальной поверхностью и конусного разделителя потока. Замеры производились в 5 точках линии измерения скорости, перпендикулярной координатной сетке, расположенной на расстоянии $3,5d$ от центра патрубка, где d – диаметр подающего патрубка. Высота линии измерения скорости соответствует диаметру подающего патрубка d .

В таблице 1 представлены результаты 4 серий натуральных замеров, в экспериментах 1 и 4 использован конусный разделитель потока 2а с высотой 40 мм, в 2 и 3 – конусный разделитель потока (2б), высота которого составляет 60 мм.



Рисунок 8 – Экспериментальная установка:

- а) общий вид экспериментальной установки; б) измерительный прибор;
в) элементы устройства снижения пылеобразования:

1 – подающий патрубок с тороидальной поверхностью; 2 – конусный разделитель потока: а – с высотой 60 мм, б – с высотой 40 мм; 3 – воздуховод вентиляционной сети; 4 – воздушный регулирующий клапан; 5 – измерительный зонд; 6 – термоанемометр; 7 – штатив; 8 – координатная сетка

Сравнение средних значений скорости с расчетами (таблица 1) показывает высокую степень их связи. Коэффициент корреляции Пирсона равен $0,998 \pm 0,0029$. Достоверность расчетов подтверждаются критерием Стьюдента равным $0,024$, адекватность расчетов подтверждается критерием Фишера равным $1,47$.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные величины скорости

№ эксперим.	Скорость, м/с						результаты численного эксперимента	
	натурные замеры в точках линии измерения скорости					среднее значение по линии измерения скорости	SolidWorks	уравнения регрессии
	1	2	3	4	5			
1	4,63	4,54	4,52	3,97	3,27	4,186	4,76	4,205
2	2,53	1,42	1,21	1,04	0,56	1,352	1,2	1,299
3	0,91	0,69	0,53	0,51	0,42	0,612	0,64	0,478
4	0,09	0,23	0,61	1,1	0,73	0,552	0,23	0,266

Поскольку сравнения показали хорошую сходимость экспериментальных и численных результатов, дальнейшее исследование было продолжено при помощи вычислительных экспериментов в программном комплексе SolidWorks.

4. В результате вычислительных экспериментов определены конструктивно-эксплуатационные параметры устройства для снижения пылеобразования, способствующие формированию веерных коандовских течений.

В качестве плана эксперимента принят ЦКОП (таблицы 2 и 3). В качестве факторов эксперимента приняты геометрические характеристики разрабатываемого устройства для снижения пылеобразования (таблица 2, рисунок 9).

В качестве отклика принята максимальная V_{max} и средняя V_{med} составляющая проекции скорости на ось X. Измерение скорости осуществлялось на расстоянии $2d_{вх}$ от оси тора (рисунок 10). Высота линии измерения скорости соответствует диаметру подающего патрубка d .

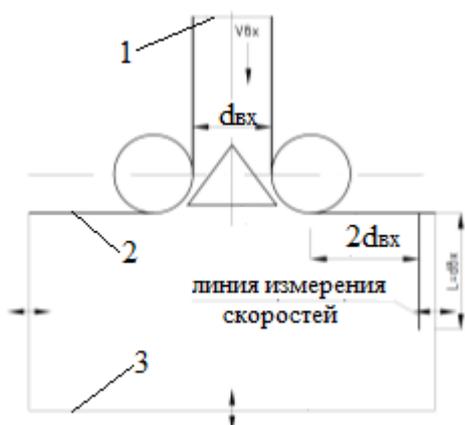


Рисунок 9 – Граничные условия вычислительного эксперимента:
1 – плоскость входа воздуха;
2 – непроницаемые стенки; 3 – плоскость свободного давления

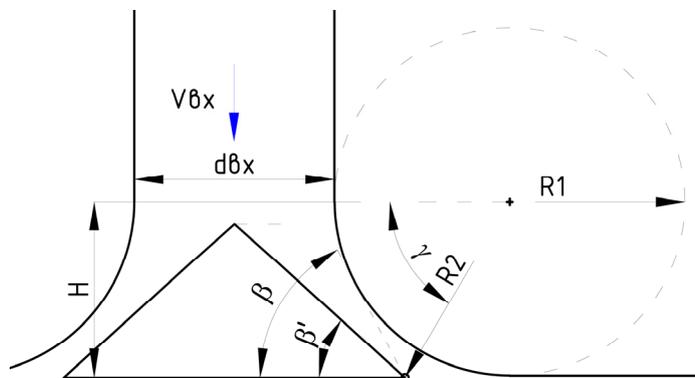


Рисунок 10 – Факторы эксперимента оказывающие влияние на налипание струи

Таблица 2

Область факторного пространства ЦКОП

Факторы	Уровни варьирования					Шаг
	-1,287	-1	0	+1	+1,287	
R_1/R_2	0,61	0,65	0,8	0,95	0,99	0,15
β'/β	0,049	0,15	0,5	0,85	0,95	0,35
γ	1,24	11	45	79	88,76	34

На рисунках 11, 12 приведены результаты экспериментальных исследований, в соответствии с которыми наблюдается зависимость: с увеличением составляющей скорости на ось X наблюдается более устойчивое налипание струи. Максимальное значение составляющей скорости на ось X достигается в эксперименте №4. Налипания струи в экспериментах 9 и 11 не происходит, имеющееся

соотношение конструктивных параметров не обеспечивает формирование условий для проявления эффекта Коанда. В экспериментах 1,4, 5, 7, 10, 13 данный эффект сохранил свое проявление при скорости во входном патрубке 15 м/с и 25 м/с.

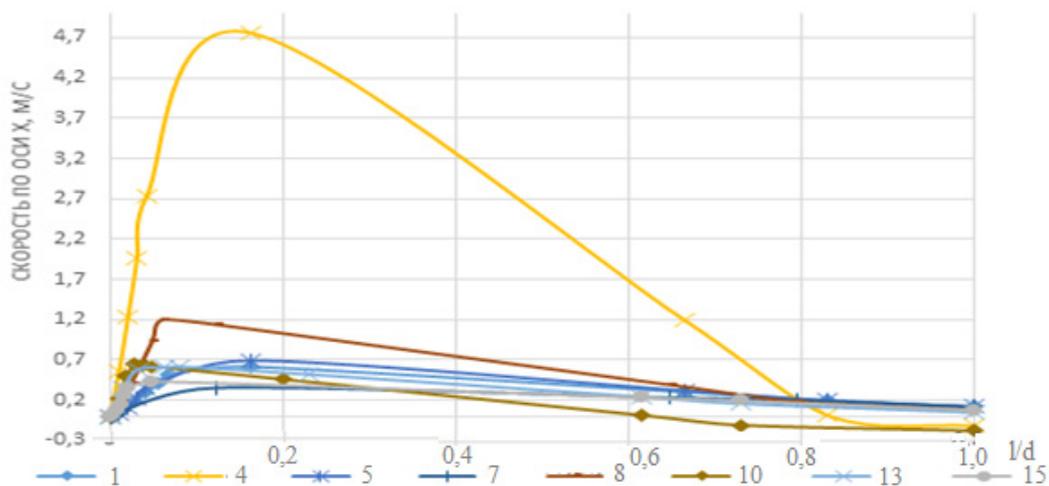


Рисунок 11 – Профили скоростей на измеряемой линии при $V_{вх} = 5$ м/с, построенные по результатам экспериментов, где произошло налипание струи

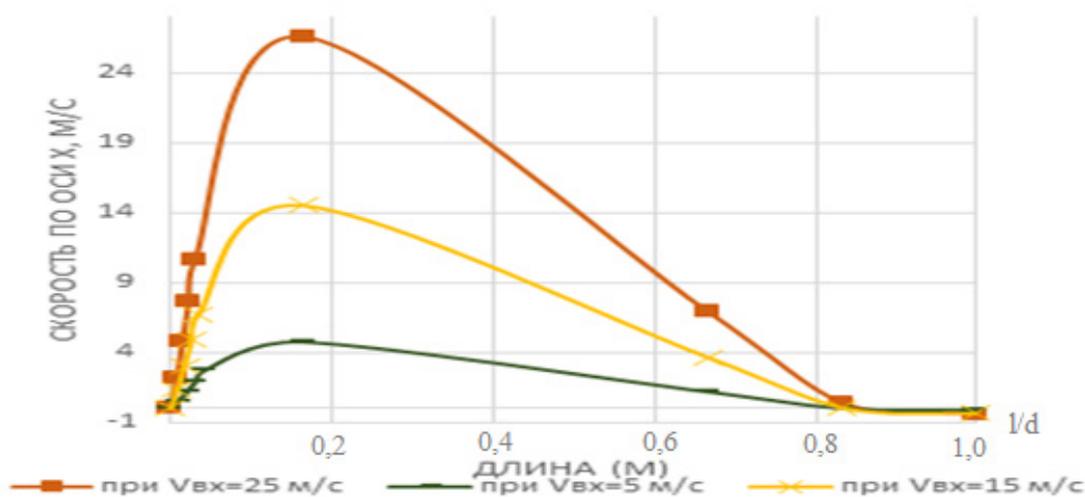


Рисунок 12 – Профили скоростей на измеряемой линии в эксперименте №4 при различных значениях $V_{вх}$

Таким образом, можно выделить три типа струи: налипающая на верхнюю стенку (эксперименты 1, 4, 5, 7, 8, 10, 13, 15), струя бьющая практически вертикально вниз (эксперименты 2, 3, 6, 9, 12, 14, 16) и струя бьющая под углом (эксперимент 11).

5. Получены уравнения регрессии, позволяющие определить конструктивно-режимные характеристики устройства снижения пылеобразования, рекомендуемые к использованию в методике расчета обеспыливающей вентиляции бункеров.

Для выявления рационального соотношения конструктивно-режимных параметров обеспечивающего создание эффекта Коанда, получены уравнения регрессии, на основании которых были получены функции желательности.

Полученные регрессионные уравнения имеют приемлемый уровень значимости, коэффициент детерминации составляет 0,78. На рисунке 13 представлен график наблюдаемых и предсказанных значений.

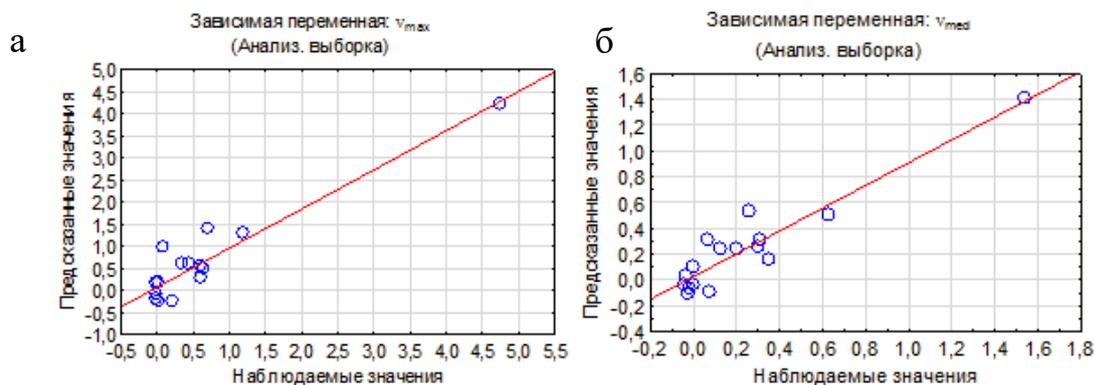


Рисунок 13. Графики наблюдаемых и предсказанных значений:
а) проекции скоростей V_{\max} на ось X, б) проекции скоростей V_{med} на ось X

На основании полученных регрессионных уравнений были определены функции желательности, соответствующие предсказанным значениям каждой зависимой переменной. В нашем случае желаемым значением отклика является максимальное значение V_{\max} и V_{med} , так как именно в этом случае налипание струи проявляется наиболее характерно. При этом функция желательности определялась при следующих диапазонах исследуемых факторов: $R_1/R_2 = 0,7 \dots 0,9$; $\beta'/\beta = 0,15 \dots 0,85$; $\gamma = 10 \dots 80$. Данные диапазоны соответствуют технологическим характеристикам перегрузок материалов.

В качестве рациональных конструктивных параметров приняты следующие значения: $R_1/R_2 = 0,9$; $\beta'/\beta = 0,85$; $\gamma = 80^\circ$.

Необходимо отметить, что на налипание струи особое влияние оказывает малый размер щели между конусом и тором, положение конуса, обеспечивающее наилучшее подтекание воздуха к конусу снизу и достаточно высокий угол β' . Именно при таком сочетании проявляется эффект Коанда в исследуемом грузозачном устройстве. Т. е. в случаях, когда щель становилась шире, или конус слишком сильно опускался вниз или поднимался вверх, происходит разрушение налипающей струи.

Учет конструктивно-режимных характеристик устройства для снижения пылеобразования позволит уточнить методику расчета системы обеспыливающей вентиляции для бункеров при их пневмотранспортной загрузке порошковыми материалами.

6. Разработаны рекомендуемые схемы и методика расчета систем вентиляции бункеров при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов. Получены результаты промышленных испытаний и технико-экономической оценки работы предлагаемых систем вентиляции.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований были разработаны схемы систем вентиляции, отличающиеся от аналогов повышенной эффективностью, выражающейся в снижении концентрации пылевых частиц в вентиляционных выбросах. Что обеспечивается за счет снижения

а



б

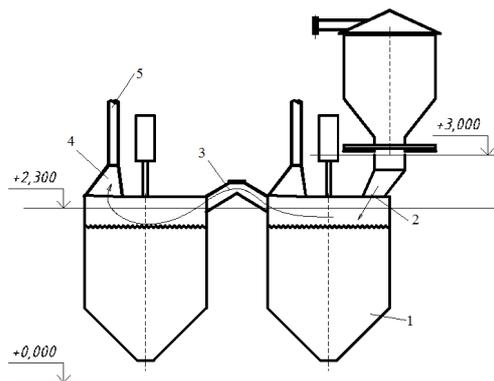


Рис. 15. Цех водосодержащих эмульсий:

а – вид цеха до реконструкции, б – предложенная схема обвязки диссольверов: 1 – диссольвер, 2 – загрузочный узел, 3 – переточный канал, 4 – аспирационная воронка, 5 – воздуховод системы аспирации

Внедрение рекомендуемой системы вентиляции обеспечило снижение запыленности на рабочих местах в цехах с $15,59 \text{ мг/м}^3$ до $8,48 \text{ мг/м}^3$, а социально-экономический эффект составил 67,8 тыс. руб./год.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача по повышению эффективности системы обеспыливающей вентиляции при пневмотранспортной загрузке бункеров порошкообразными материалами за счет совершенствования узла загрузки и использования эффекта Коанда.

По итогам диссертационного исследования получены следующие результаты.

1. Проведен анализ существующих технологических схем производства цемента, систем аспирации бункеров, конструктивного оформления загрузочных узлов. Рассмотрены основные факторы пылеобразования при загрузке порошковых материалов в бункер. Установлена необходимость разработки системы обеспыливающей вентиляции, исключающей вторичное пылеобразование в бункере вследствие эрозии складированного материала.

2. Из дифференциальных уравнений классической теории пограничного слоя получены аналитические выражения для определения составляющих скорости воздушного потока в осесимметричных, плоских и веерных струях при загрузке бункеров. Из сравнения построенных профилей составляющих скорости следует, что минимальной пылеобразующей способностью обладает веерная струя.

3. Разработана и запатентована оригинальная конструкция устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов, в аэродинамическую схему которого заложен эффект Коанда, формирующий веерную струю с изменением направления ее движения, что обеспечивает снижение эрозии складированного материала. Экспериментально подтверждена работоспособность

конструкции устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов.

4. Разработана математическая модель воздушного течения в загрузочном узле бункера в программном комплексе SolidWorks. Путем сравнения натуральных и вычислительных экспериментов установлены достоверность и адекватность расчетных полей скоростей, формируемых предложенным устройством для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих веществ. Определены эффективные режимы работы устройства, обеспечивающие формирование коандовского течения у крышки бункера.

5. Получены регрессионные уравнения, позволяющие определить рациональные конструктивно-режимные характеристики устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов, обеспечивающие создание необходимых условий, обеспечивающих инерционную сепарацию и осаждение частиц в полости бункеров.

6. Разработаны рекомендованные схемы и методики расчета систем вентиляции бункеров при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов, обеспечивающих снижение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе за счет включения в аэродинамическую схему загрузочного узла эффекта Коанда.

7. Проведены промышленные испытания устройства для снижения пылеобразования в условиях загрузки группы из 4 цементных силосов с учетом установки предлагаемого устройства в один из них. Запыленность воздуха перед рукавным фильтром снизилась с 8998,016 мг/Нм³ до 5886,50 мг/Нм³, количество пыли в аспирационном воздухе уменьшилось с 22,202 г/с до 14,660 г/с.

8. Внедрение результатов исследований в проект систем аспирации, общеобменной вентиляции цеха водосодержащих эмульсий филиала ООО «Тиккурила» г. Старый Оскол для диссольверов шпаклевки «ПБ» и узла загрузки мобильного бункера обеспечило снижение запыленности на рабочих местах в цехах с 15,59 мг/м³ до 8,48 мг/м³.

9. Выполнено экономическое обоснование использования рекомендуемых систем вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов: социально-экономический эффект составил 67,8 тыс. руб., предотвращенный экологический ущерб – составил 222,97 тыс. руб./год.

Благодаря проведенным исследованиям даны практические **рекомендации** по повышению эффективности систем вентиляции при пневмотранспортной загрузке сыпучих материалов, выражающиеся в снижении концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе, а соответственно и в вентиляционных выбросах от бункеров за счет формирования в загрузочном узле коандовских течений.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в совершенствовании систем вентиляции за счет модернизации конструкции переточного канала между бункерами и развития методов их расчёта при помощи современных достижений вычислительной аэромеханики.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Монографии

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

2. Уваров В.А. Методы и средства очистки вентиляционных выбросов / В.А. Уваров, Б.Ф. Подпоринов, **А.С. Семенов** // Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 98 с.

Рецензируемые научные журналы и издания перечня ВАК

3. **Семенов А.С.** Снижение пылеобразования при загрузке бункеров сыпучими материалами / Семенов А.С., Логачев И.Н. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2006. № 14. С. 251-254.

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

5. Маконин А.Л. Бункеры силосного типа / Маконин А.Л., **Семенов А.С.** // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-1. С. 42-43.

6. Подпоринов Б.Ф. Пути повышения эффективности пылеулавливающих аппаратов в системах очистки вентиляционных выбросов / Подпоринов Б.Ф., **Семенов А.С.** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №11. С. 104-107.

7. **Семенов А.С.** Экспериментальные установки для определения условий реализации коандовских течений / **Семенов А.С.** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. №3. С. 52-59.

8. **Семенов А.С.** Снижение пылеобразования при пневмотранспортной загрузке порошкообразных материалов / **Семенов А.С.** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. №4. С. 56-61

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

9. Logachev I.N. Velocity field for fan weakly swirled jet of loading spouts for fine materials / Logachev I.N., Logachev K.I., Uvarov V.A., **Semenko A.S.**, Goltsov A.B., Kireev V.M. // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Т. 8. № 4. С. 24880.

10. Kireev V.M. Determination of the height of aspiration shelter funnel / Kireev V.M., Buryanov I.A., Minko V.A., **Semenko A.S.**, Goltsov A.B. // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Т. 8. № 4. С. 22538.

11. Ovsyannikov Y.G. Reducing the power consumption of ventilation systems through forced recirculation / Ovsyannikov Y.G., Gol'tsov A.B., **Semenko A.S.**, Logachev K.I., Uvarov V.A. // Refractories and Industrial Ceramics. 2017. С. 1-5.

Объекты интеллектуальной собственности

12. п.м. 48318 РФ Логачев И.Н., Овсянников Ю.Г., Семиненко А.С., Никитенко Б.Л. Устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих веществ / No.: 2005117396/22, заяв. 06.06.2005; опубл. 10.10.2005.

13. п.м. 142259 РФ Семиненко А.С., Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Алифанова А.И., Попов Е.Н., Киреев В.И., Гольцов А.Б. Аспирационное укрытие мест перегрузки сыпучего материала / No.: 2014105607/03, заяв. 14.02.2014 опубл.: 27.06.2014.

14. п.м. 161397 РФ Семиненко А.С., Логачев И.Н., Кондрашева М.Р., Алифанова А.И. Аспирационное укрытие мест перегрузки сыпучего материала / No.: 2015155457/03, заяв. 23.12.2015; опубл. 20.04.2016.

15. п.м. 177236 РФ Овсянников Ю.Г., Гольцов А.Б., Семиненко А.С., Киреев В.М., Бурьянов И.А., Жилина С.С. Укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха / No.: 2017112163, заявл. 10.04.2017, опубл. 14.02.2018.

В других изданиях

16. Семиненко А.С. Применение эффекта Коанда в системах пылегазоочистки / Семиненко А.С., Никитенко Б.Л. // Сборник докладов Международной научно-практической конференции. – Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. – Ч.1. С.255-257.

17. Семиненко А.С. Центробежная сепарация пылевых частиц в обеспыливании воздуха / Семиненко А.С., Никитенко Б.Л. // Сборник докладов Международной научно-практической конференции. – Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. – Ч.1 с.249-251.

18. Семиненко А.С. Аспирация цементных силосов / Семиненко А.С., Никитенко Б.Л., Логачев И.Н. // Актуальные проблемы современной науки: труды 1-го Международного форума. Технические науки. Ч. 20-21: Архитектура и строительство. – Самара: изд-во СГАСА, 2005. с.38-40.

19. Семиненко А.С. Инерционное сепарирование в узлах загрузки бункеров / Семиненко А.С., Логачев И.Н., Феоктистов А.Ю., Гольцов А.Б., Киреев В.М. // Современные проблемы технического естественно-научного и гуманитарного знания: Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. – Губкин: «Интерфейс», 2007 г. с. 110-113.

20. Семиненко А.С. Снижение пылеобразования при загрузке бункеров сыпучими материалами / Семиненко А.С., Солодовников В.Н. // Наука и молодежь в начале нового столетия: Сборник докладов международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Губкин: ИП Уваров В.М., 2008. – Ч.1 с. 193-196

21. Семиненко А.С. Оптимизация системы аспирации цементных силосов / Семиненко А.С., Е.Н. Попов // 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.

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

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

24. Семиненко А.С. Повышение эффективности систем аспирации при загрузке цементных силосов // Сборник работ победителей отборочного тура Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям, г. Новочеркасск, октябрь-ноябрь 2011 г. / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. ун-т. (НПИ). – Новочеркасск: Лик, 2011. – с.343-346.

25. Семиненко А.С. Повышение эффективности аспирации при загрузке бункеров порошкообразными материалами / Семиненко А.С., Логачев И.Н. // Сборник работ инновационных проектов молодых ученых по результатам Всероссийского Конкурса «Инновационный потенциал молодежи 2012» / Ульяновский государственный университет. – Ульяновск: ООО «Колор-Принт», 2011. – Ч.4 – с.73-78.

26. Логачев И.Н. Основные уравнения динамики частиц в бункерах силосного типа при пневмотранспортной загрузке / Логачев И.Н., Логачев К.И., Семиненко А.С. // Научные труды SWorld. 2013. Т.35. № 4. С. 61-67.

27. Logachev I.N. Basic equations of particle dynamics in silo type hoppers during pneumatic charging / Logachev I.N., Logachev K.I., Seminenko A.S. // Modern scientific research and their practical application, Vol.J11404, 2014.

28. Seminenko A.S. Pressure gradient in integrated model of attached jets description / Seminenko A.S., Goltcov A.B., Alifanova A.I., Kondrasheva M.R. // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences Vienna, Austria, 2014. С. 111-115.

29. Seminenko A.S. About the production of dust in the cement industry / Seminenko A.S., Alifanova A.I., Goltcov A.B., Kondrasheva M.R. // SWorldJournal. 2015. Т.4. №1(8). С. 15-19.

30. Логачев А.К. Математическое моделирование процессов аспирации и разработка научных основ создания энергоэффективных систем локализации пылегазовых выделений / Логачев А.К., Крюков И.В., Попов Е.Н., Семиненко А.С., Крюкова О.С. // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2017. С. 170-179.

31. Семиненко А.С. Повышение эффективности систем аспирации цементных силосов // В сборнике: Энергосбережение и энергоэффективность на промышленных предприятиях и в жилищно-коммунальном хозяйстве материалы I Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой памяти д-ра техн. наук, профессора, А. А. Сандера. 2017. С. 148-154.

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 33.

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.