

На правах рукописи

МАРТЬЯНОВА АННА ЮРЬЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВАКУУМНЫХ
СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЦЕМЕНТА И
СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: **Суханова Инна Ивановна**
кандидат технических наук, доцент;

Официальные оппоненты: **Аверкова Ольга Александровна**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Белгородский технологический
государственный университет им. В.Г. Шу-
хова», кафедра теплогазоснабжения и венти-
ляции, 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 «Волгоградский
государственный технический
университет»**

Защита диссертации состоится 27 декабря 2017 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/martyanova-anna-yurevna>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент

Виктор Алексеевич Пухкал

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность выбранной темы. Технологические процессы при производстве цемента и сухих строительных смесей связаны с такими операциями как дробление, смешивание, транспортирование минерального сырья и готовой продукции. Фракционный состав материалов в ходе переработки и транспортирования изменяется от крупнокускового (до 80 мм) и мелкокускового (до 10 мм) до порошка. Процесс перемещения сыпучих материалов сопровождается интенсивным выделением пыли, основным способом удаления которой на предприятиях является устройство местной вытяжной вентиляции (аспирации). Но, как показывает анализ исследований, отсутствие технической возможности полной герметизации пылящего оборудования обуславливает недостаточно эффективную работу систем аспирации. Кроме того, часть используемого сырья переходит в отходы и просыпи, которые являются источником вторичного образования пыли. Большинство сыпучих строительных материалов являются слеживающимися материалами, которые перед транспортированием необходимо разрыхлить.

Своевременное и быстрое удаление пыли и просыпей от мест их образования сказывается не только на эффективности и надежности работы технологического оборудования, но и на создании благоприятных условий труда.

Существующие методы удаления пыли и просыпей (ручная, сжатым воздухом) приводят к вторичному пылеобразованию. Наиболее эффективным способом сбора пыли и просыпей является вакуумный. Этот способ предотвращает вторичное попадание пыли с поверхности в воздушную среду, удаляет пыль с различных по характеру и назначению поверхностей, из труднодоступных мест. Удаляемые при уборке пыль и просыпи, собираются в специальных резервуарах и возвращаются в технологический процесс.

Несмотря на отмеченные достоинства, системы вакуумной пылеуборки не нашли еще широкого распространения на заводах строительных материалов. Зачастую отсутствуют необходимые для расчета систем аэродинамические характеристики такие, как скорости витания и транспортирования перемещаемого материала. Это приводит к ошибкам при проектировании систем, подборе оборудования и, как следствие, недостаточно эффективной их работе.

Таким образом, проведение экспериментальных и аналитических исследований, которые направлены на совершенствование расчета вакуумных систем обеспыливания на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей, является актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в теоретическое обоснование и техническое воплощение в практику различных вариантов пылеочистки даны в работах отечественных и зарубежных ученых: О.А. Аверковой, В.Н. Азарова, А.Н. Александрова, В.Е. Воскресенского, И. Гастерштадта, А.М. Гримитлина, К.М. Гринева, Т.А. Дацюк, О.Н. Зайцева, М.Г. Зиганшина, М.П. Калинушкина, Л.С. Клячко, П.А. Коузова, Ю.М. Кузнецова, А.А. Курникова, И.Н. Логачева, К.И. Логачева, В.И. Минко, В.В. Недина,

О.Д. Нейкова, А.И. Пирумова, В.И. Полушкина, С.Н. Святкова, А.И. Страховича, В.А. Успенского и др.

Цель исследования заключается в совершенствовании методов расчета и подбора оборудования вакуумных систем обеспыливания на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей, экспериментальном выявлении скорости транспортирования сыпучих строительных материалов.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

- проанализировать результаты отечественных и зарубежных исследований в области обеспыливающей вентиляции;
- разработать схему и смонтировать экспериментальную установку для изучения движения частиц в потоке воздуха;
- выполнить экспериментальные исследования скорости витания твердых частиц с различной массовой концентрацией, плотностью и размерами;
- получить зависимость скорости витания твердых частиц от концентрации, плотности и размеров;
- разработать численные модели взаимодействия потока воздуха с неподвижными твердыми частицами в воздуховоде и процесса витания твердых частиц;
- выполнить сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными исследованиями;
- выполнить экспериментальные исследования скоростей транспортирования твердых частиц по наклонному и горизонтальному трубопроводу и получить зависимость скорости транспортирования от скорости витания и угла наклона;
- разработать программы расчета воздухопроводов и подбора оборудования для вакуумных систем обеспыливающей вентиляции.

Объект исследования – системы обеспыливающей вентиляции на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей.

Предмет исследования – методы расчета параметров вакуумных систем обеспыливания на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Получены эмпирические зависимости скоростей витания твердых частиц от диаметра, плотности и характерной для расчетов систем вакуумной уборки массовой концентрации, позволяющие в отличие от существующих методов вычислять скорость витания не только одиночной частицы, но и совокупности частиц.

2. На основании экспериментальных исследований установлены зависимости для определения скорости транспортирования твердых частиц в наклонном воздуховоде, уточняющие существующие методы расчета.

3. Разработана численная модель обтекания твердых неподвижных частиц потоком воздуха в зависимости от их концентрации для определения аэродинамических характеристик (давление на частицу, скорость воздуха) в воздуховоде.

4. Разработана численная модель для определения скорости витания твердых частиц различных размеров, плотности и концентрации, позволяющая рассчитывать скорости витания в реальных условиях систем обеспыливания.

5. Разработаны программы расчета вакуумных систем обеспыливания по определению диаметров воздухопроводов и подбору оборудования систем всасывающего пневмотранспорта. Программы позволяют выполнять точный и быстрый подбор оборудования.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии теории обеспыливания воздуха на предприятиях строительного комплекса и методов расчета вакуумных систем обеспыливания.

Практическая значимость работы состоит в следующем: Разработана компьютерная программа «Подбор мощности вакуумного насоса в системах пневмотранспорта» (свидетельство о государственной регистрации №2015619490 04 сентября 2015 года), компьютерная программа для расчета воздухопроводов систем всасывающего пневмотранспорта. Результаты исследований внедрены на предприятиях ООО «АЖИО», ООО «Гидроцем» (г. Санкт-Петербург) и в учебный процесс обучения студентов по направлению «Строительство» в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются основные положения теории аэродинамики аспирационных систем и математического моделирования гидродинамических потоков. В диссертационной работе использованы методы математической статистики планирования эксперимента; теория численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

- новые зависимости скорости витания твердых частиц от диаметра, плотности и массовой концентрации;
- зависимости скорости транспортирования твердых частиц в наклонном и горизонтальном воздухопроводах от скорости витания, полученные по результатам экспериментальных исследований на разработанной опытной установке;
- численная модель распределения скорости воздуха в воздуховоде, заполненном различным количеством неподвижных частиц, и распределения давления по их поверхности;
- численная модель процесса движения частиц в вертикальном воздуховоде для определения скорости витания твердых частиц различных размеров и плотности;
- программы расчета воздухопроводов и подбора оборудования систем всасывающего пневмотранспорта («Подбор мощности вакуумного насоса в системах пневмотранспорта», свидетельство о государственной регистрации № 2015619490 04 сентября 2015 года).

Область исследования соответствует требованиям паспорта специальности 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно п. 1 «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплоснабжения, отопления, вентиляции и кон-

диционирования, 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».

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов исследования подтверждается использованием фундаментальных положений теории аэродинамики аспирационных систем и методов математического анализа с применением современного программного обеспечения; правомочностью принятых допущений; результатами натурных и лабораторных исследований; удовлетворительной сходимостью результатов аналитических расчетов с данными, полученными экспериментальным путем.

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на 62-й Международной научно-технической конференции молодых ученых (СПбГАСУ, 2009 г.), Научных конференциях профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов (СПбГАСУ, 2010-2011 гг.), Международном конгрессе «Наука и инновации в современном строительстве» (2012 г.), V Международной конференции «Актуальные проблемы архитектуры и строительства» (2013 г.), Международных научно-технических конференциях молодых ученых, аспирантов и докторантов (СПбГАСУ, 2014-2015 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 печатных работах общим объемом 3,6 п.л., в том числе общим объемом 2,0 п.л. в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав с выводами по каждой из них, общих выводов, содержит 153 страниц печатного текста и 38 страниц приложений, 25 таблиц, 49 рисунков и список литературы из 134 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, охарактеризована научная новизна исследования, представлена практическая значимость полученных результатов, а также приведены сведения об апробации и публикациях.

В первой главе выявлены основные источники образования пыли и просыпей на предприятиях строительной индустрии; рассмотрены особенности систем удаления пыли и просыпей на предприятиях строительной индустрии; проведен анализ существующих методов расчета всасывающих систем обеспыливания.

Во второй главе проведен анализ известных экспериментальных установок для определения скорости витания твердых частиц; разработана схема и смонтирована экспериментальная установка; проведен плановый трехфакторный эксперимент, получено уравнение регрессии скорости витания монодисперсного материала, установлены зависимости скорости транспортирования в наклонном и горизонтальном воздуховоде от скорости витания.

В третьей главе описана численная модель распределения скорости воздуха в воздуховоде, заполненном различным количеством неподвижных шарообразных частиц, давления по поверхности частиц; разработана математическая модель экспериментальной установки для определения скорости витания монодисперсных материалов; выполнено математическое моделирование скорости витания и проанализированы его результаты.

В четвертой главе разработаны методика и компьютерные программы для расчета воздухопроводов и подбора оборудования систем всасывающего пневмотранспорта.

В заключении изложены основные итоги диссертационного исследования, приведены предложения о направлениях дальнейших исследований.

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

1. Получены эмпирические зависимости скоростей витания твердых частиц от диаметра, плотности и характерной для расчетов систем вакуумной уборки массовой концентрации, позволяющие, в отличие от существующих методов, вычислять скорость витания не только одиночной частицы, но и совокупности частиц

Экспериментальная установка для исследования скоростей витания монодисперсного материала с различной массовой концентраций в вертикальном трубопроводе представлена на рисунке 1.

Установка оборудована вентилятором с электродвигателем (4). Плавное изменение числа оборотов рабочего колеса вентилятора осуществляется лабораторным автотрансформатором ЛАТР (5). Для защиты вентилятора от попадания в него мелкодисперсных фракций установлен канальный фильтр (3) ФЛК 160. Расход воздуха определяется микроманометром ММН-2400 в сечении за плавным входным коллектором (1), внутренний профиль которого очерчен по лемнискате Бернулли, что обеспечивает равномерное поле скоростей.

Для наблюдения за движением материала и проведения съемки, труба витания (2) имеет вертикальный прозрачный участок, выполненный из оргстекла. На конусе нанесена шкала с указанием диаметров воздуховода, начало которой совпадает с нижним основанием конуса.

Учитывая преобладание мелкокусковых фракций, теряемых в виде отходов и просыпей при производстве цемента и сухих строительных смесей, для проведения эксперимента приняты шарообразные частицы диаметром 2,5; 5; 10 мм и плотностью 400 и 800 кг/м³.

Результатом проводимых исследований является регрессионная зависимость скорости витания от совокупности факторов. В качестве факторов варьирования для проведения планового эксперимента были выбраны плотность материала частиц (x_1), размер частиц (x_2) и их массовая концентрация (x_3).

В качестве функции отклика принята скорость витания частицы u , м/с, в вертикальном воздуховоде.

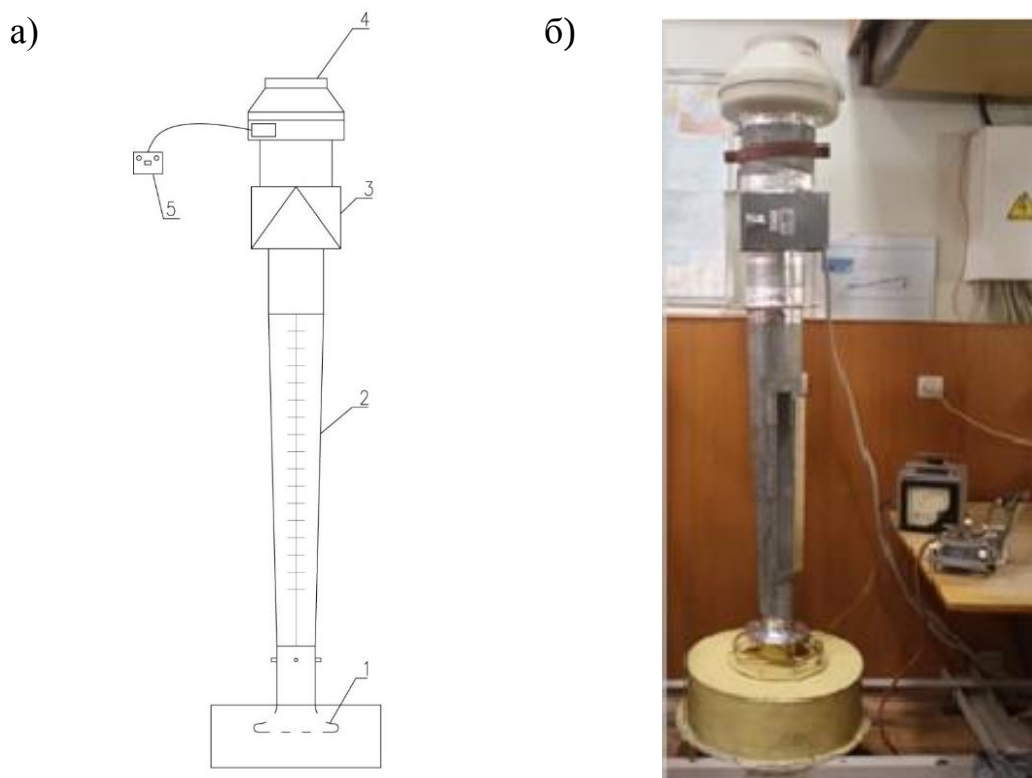


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки (а), экспериментальная установка (б)

С целью проверки воспроизводимости и выполнения статистических оценок данных экспериментальных исследований проведены три параллельных циклов опытов. Оценка воспроизводимости экспериментальных исследований выполнена на основании сопоставления расчетного и табличного критериев Кохрена, значимость коэффициентов проверена после сопоставления табличных значений критерия Стьюдента с расчетными. Проверка адекватности уравнений проведена по расчетному и табличному значению критерия Фишера. Проведенные эксперименты позволили получить уравнение (1) для расчета скорости витания в зависимости от трех факторов.

После перехода от кодированных факторов к натуральным переменным уравнение имеет вид:

$$w_{\text{вит}} = 5,42 - 2,37 \cdot 10^{-4} \rho_{\text{ч}} + 955,98 d - 5,86 \mu + 8,46 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{ч}} \mu - 454,11 d \mu, \quad (1)$$

где μ – массовая концентрация, кг/кг; d – диаметр частицы, м; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы, кг/м³.

Уравнение (1) позволяет определять скорость витания совокупности твердых частиц монодисперсного материала различных размеров и массовой концентрации при плотности от 200 кг/м³ до 900 кг/м³. Диапазон концентраций при использовании формулы зависит от плотности материала, поэтому рекомендуется использование формулы (1) при массовой концентрации от 0,1 до 1,4 кг/кг, что удовлетворяет условиям пылеуборки в производственных помещениях.

Результаты экспериментов в виде зависимости скорости витания материала от массовой концентрации представлены на рисунке 2 в сравнении с данными регрессионного анализа.

Анализ результатов показывает, что с увеличением массовой концентрации скорость витания частиц уменьшается.

После обработки результатов измерений скорости витания группы шарообразных частиц при различной массовой концентрации получено критериальное уравнение:

$$Re_k = 1,74 Ar^{0,5} (1 + \mu)^{-0,5}, \quad (2)$$

где Ar – критерий Архимеда, $Ar = \frac{gd^3}{\nu^2} \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho}{\rho}$; g – ускорение свободного падения, м/с²; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

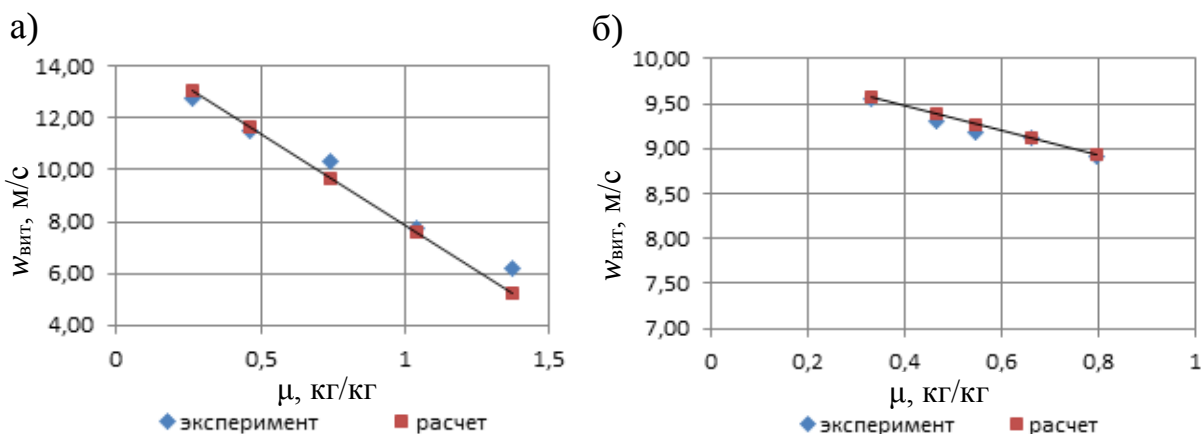


Рисунок 2 – Экспериментальные (эксперимент) и расчетные (расчет) зависимости скорости витания от массовой концентрации для частиц плотностью и диаметром, соответственно а) $\rho_{\text{ч}} = 400 \text{ кг/м}^3$, $d = 10 \text{ мм}$; б) $\rho_{\text{ч}} = 800 \text{ кг/м}^3$, $d = 5 \text{ мм}$

На рисунке 3 приведены экспериментальные значения числа Рейнольдса $Re_{\text{э}}$, определенного через экспериментальные значения скорости витания и диаметр частицы $Re_{\text{э}} = \frac{w_{\text{вит}} \cdot d}{\nu}$, и результаты обработки данных по формуле (2)

Re_k для частиц плотностью $\rho_{\text{ч}} = 400 \text{ кг/м}^3$ и диаметром $d = 10 \text{ мм}$ (а), $\rho_{\text{ч}} = 800 \text{ кг/м}^3$ и $d = 5 \text{ мм}$ (б).

Анализ полученных результатов и данных других авторов позволил получить следующее соотношение скорости витания группы частиц $w_{\text{вит.гр}}$ к скорости витания одиночной частицы $w_{\text{вит.ч}}$, учитывающее взаимное влияние частиц, размеров воздуховода и частицы, массовой и объемной концентрации:

$$\frac{w_{\text{вит.гр}}}{w_{\text{вит.ч}}} = \frac{0,75 \cdot \lambda^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{0,2}}{(1 + \mu)^{0,25}}, \quad (3)$$

где D – диаметр трубопровода, м; λ – коэффициент, отражающий взаимное влияние частиц, $\lambda = \frac{4 + 3 \cdot \mu' + 3 \cdot (8 \cdot \mu' - 3 \cdot \mu'^2)^{1/2}}{(2 - 3 \cdot \mu')^2}$; μ' – объемная концентрация, м³/м³.

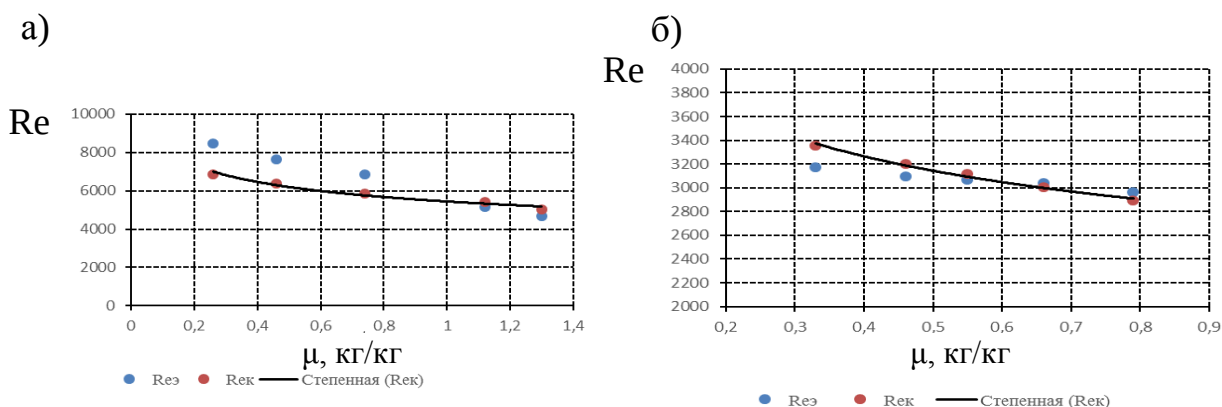


Рисунок 3 – Экспериментальные значения числа Рейнольдса Re_z и результаты обработки данных по формуле (2) Re_k

а) для частиц плотностью $\rho_{\text{ч}} = 400 \text{ кг/м}^3$ и диаметром $d = 10 \text{ мм}$, б) $\rho_{\text{ч}} = 800 \text{ кг/м}^3$, $d = 5 \text{ мм}$

Результаты экспериментальных исследований и обработки по формуле (3), позволяющие оценить взаимное влияние частиц, представлены на рисунке 4.

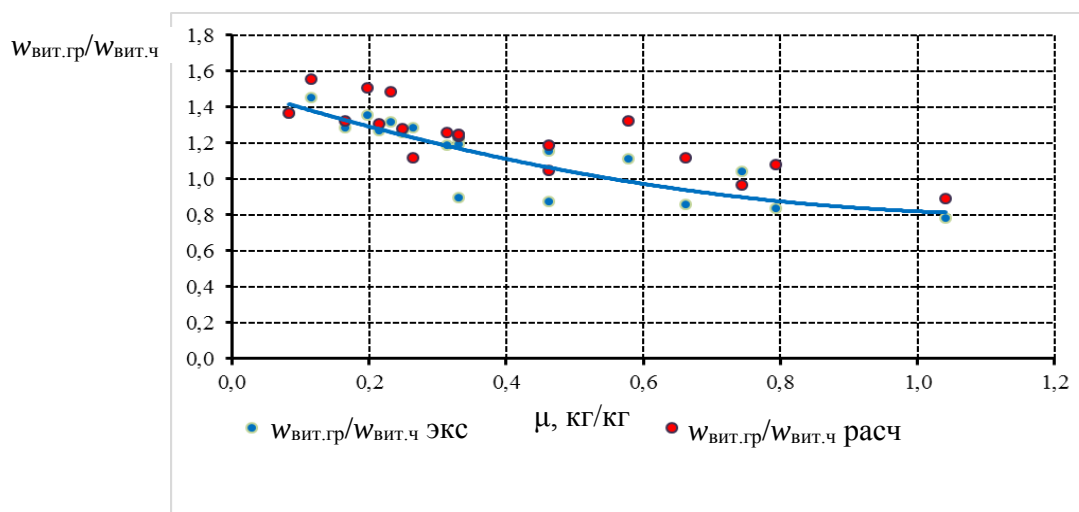


Рисунок 4 – Зависимость отношения скоростей витания группы частиц к скорости витания одиночной частицы от массовой концентрации

Результаты исследований скорости витания твердых частиц в турбулентном восходящем потоке показывают, что с увеличением количества частиц в группе скорость витания этой группы снижается вследствие взаимодействия частиц друг с другом. Кроме того, увеличение количества частиц в группе оказывает влияние на снижение скорости витания этой группы при взаимодействии воздушного потока с твердыми частицами.

2. На основании экспериментальных исследований установлены зависимости для определения скорости транспортирования твердых частиц в наклонном воздуховоде, уточняющие существующие методы расчета

Для экспериментальных исследований скорости транспортирования твердых частиц по наклонному воздуховоду использована опытная установка, в схему которой внесены следующие изменения (рисунок 5):

- воздуховод переменного сечения был заменен на воздуховод постоянного сечения;
- для изменения угла наклона воздуховода использовано координатное устройство.



Рисунок 5 – Экспериментальная установка для определения скорости транспортирования

Исследования проводились с одиночной частицей материалов, используемых в предыдущих экспериментах. Последовательность проведения измерений аналогична экспериментальным исследованиям в вертикальном воздуховоде. На рисунке 6 представлены экспериментальные значения скорости транспортирования по отношению к скорости витания частиц диаметром 10 мм и плотностью 400 кг/м^3 в наклонном воздуховоде и удельных потерь давления в наклонном воздуховоде Δp_α по отношению к потерям давления горизонтальному $\Delta p_\alpha / \Delta p_{\text{гор}}$ (рисунок 7) при различных углах наклона.

По рисунку 7 видно, что максимальное значение относительных потерь давления наблюдается при угле наклона 45° .

Если определить критерий Рейнольдса по экспериментальному значению скорости витания частицы ($Re_{\text{вит}} = w_{\text{вит}} d / \nu$), то зависимость для критерия Фруда имеет вид:

$$Fr_k = Re_{\text{вит}}^{0,89} (1 + \sin 2\alpha)^{0,5}. \quad (4)$$

На рисунке 8 приведены результаты экспериментальных исследований критерия Фруда Fr_3 , найденного по скорости транспортирования (w_T) $Fr_3 = \frac{w_T^2}{g \cdot d}$, и расчетные значения Fr_k по формуле (4) при постоянном числе Рейнольдса, определенном по скорости витания.

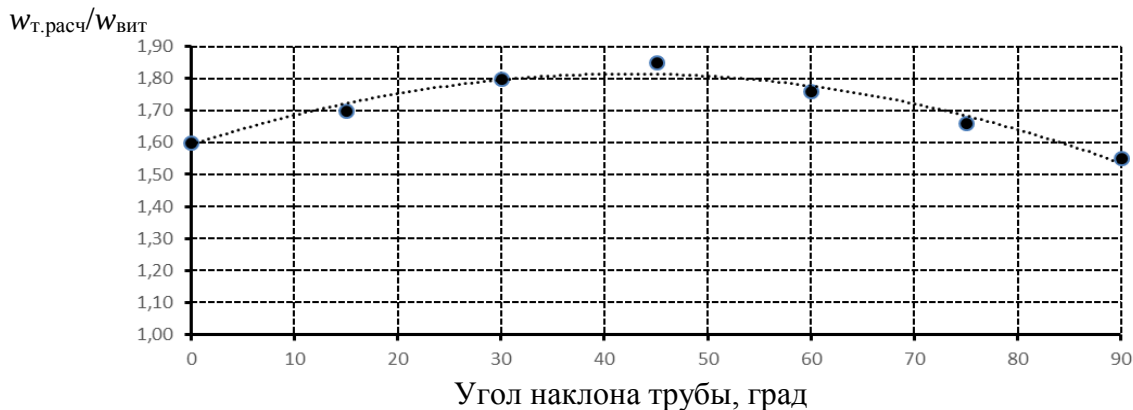


Рисунок 6 – Отношение скорости транспортирования к скорости витания в зависимости от угла наклона трубопровода

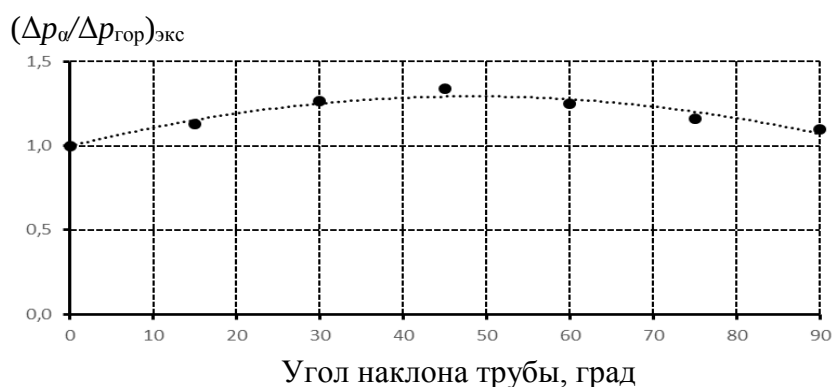


Рисунок 7 – Отношение потери давления в наклонном к потерям давления в горизонтальном воздуховоде в зависимости от угла наклона

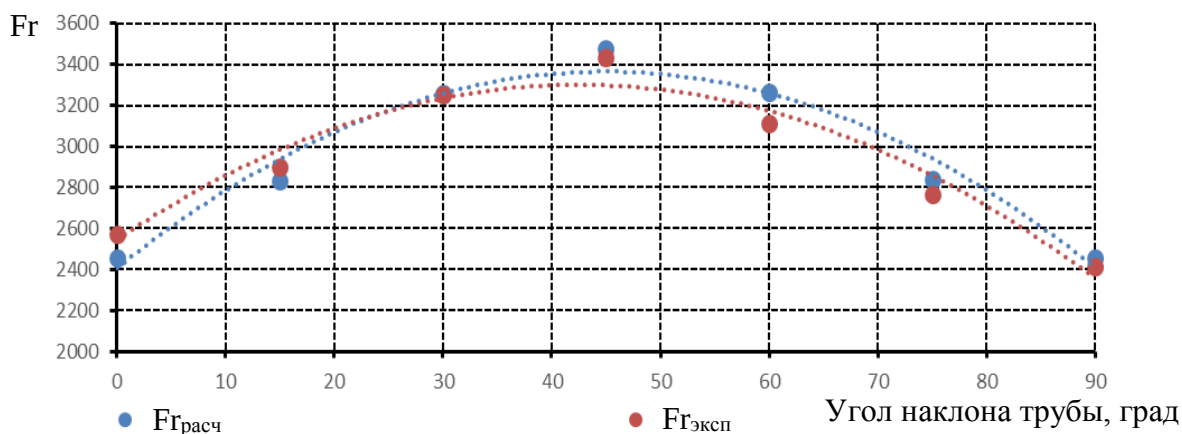


Рисунок 8 – Соотношение экспериментальных (Fr_3) и расчетных (Fr_k) значений критерия Фруда в зависимости от угла наклона трубопровода

Полученные зависимости использованы при разработке компьютерной программы для расчета воздухопроводов и подбора оборудования систем всасывающего пневмотранспорта, также могут быть использованы при проектировании вакуумных систем обеспыливания.

3. Разработана математическая модель обтекания твердых неподвижных частиц потоком воздуха в зависимости от их концентрации для определения аэродинамических характеристик (давление на частицу, скорость воздуха) в воздуховоде

Потери давления в системах обеспыливания при различной ориентации воздухопроводов зависят от взаимодействия потока воздуха с твердыми частицами, которое в первую очередь целесообразно исследовать при неподвижном размещении частиц. Для изучения обтекания неподвижных твердых частиц потоком воздуха использован программный комплекс Star-CCM+.

С одной стороны, турбулентный поток увлекает твердые частицы, а с другой, тормозится силой лобового сопротивления. Для описания такого течения в первом приближении используются уравнения количества движения для смеси и для твердой частицы. При этом предполагается, что примесь представляет собой сферические частицы одинаковых размеров.

За основу численной модели для описания турбулентных потоков принята система трехмерных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds Averaged Navier-Stokes или RANS):

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}\vec{V}) = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\nabla \cdot (\bar{\tau} + \bar{\tau}_t)}{\rho}, \quad (5)$$

и уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot (\vec{V}) = 0, \quad (6)$$

где $\bar{\tau}$ – тензор вязких напряжений, $\bar{\tau} = \mu(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{V} \bar{I}$;

$\bar{\tau}_t$ – тензор турбулентных напряжений $\bar{\tau}_t = \mu_t(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3}\mu_t \nabla \cdot \vec{V} \bar{I} - \frac{2}{3}\rho k \bar{I}$.

Для нахождения характеристик турбулентности использована k - ϵ модель турбулентности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot \left[\rho \vec{V} k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] &= \mu_t P - \rho \epsilon, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot \left[\rho \vec{V} \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] &= C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \mu_t P - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (7)$$

где P – генерационный член, $P = \mu(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) \cdot \nabla \vec{V}$; k – кинетическая энергия турбулентности; ϵ – скорость диссипации – кинетической энергии турбулентности; μ_t – турбулентная вязкость; $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ – полуэмпирические коэффициенты модели турбулентности.

В воздуховоде (рисунок 9) диаметром 0,075 м и длиной 1,5 м на расстоянии 0,5 м от входа расположены неподвижные частицы диаметром 0,005 м. Разрабо-

таны 14 вариантов моделей, 9 из которых представлены на рисунке 10, количество частиц варьируется от одной до 200, также меняется их взаимное расположение.

Скорость воздуха на входной границе принята как разность между скоростью воздушного потока и скоростью частиц по результатам экспериментальных исследований. Температура и плотность воздуха приняты постоянными. Для повышения точности расчета использовалась неструктурированная сетка с измельчением в области шарообразных частиц (рисунок 9.а). Вблизи стенок трубы и частиц сделаны призматические слои с соответствующим сгущением к поверхностям (рисунок 9.б).

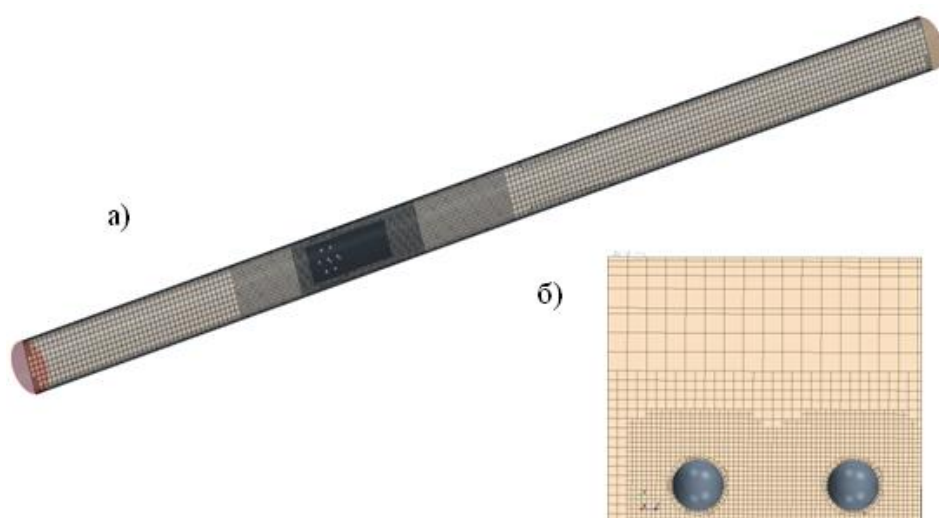


Рисунок 9 – Расчетная сетка (а); фрагмент расчетной сетки (б)

Количество ячеек в расчетной сетке для различных задач находится в диапазоне от 531 тыс. ячеек для одной частицы, до 3,5 млн. ячеек для максимально возможного количества частиц (200 частиц). При проведении численного эксперимента выполнена оценка сходимости, расчет считался законченным при достижении стационарности величины давления на неподвижную частицу.

В результате расчетов получены поля скоростей и давления, формирующиеся в воздуховоде (рисунок 10). На рисунке 10 поля давлений представлены на шарообразных частицах, а поля скоростей – в пространстве между частицами.

Давление на отдельную частицу также возрастает. Получены суммарные силы давления на каждую частицу как интеграл давления по поверхности. Используя понятие относительной силы давления $P_{\text{отн}}$, как отношение силы давления на частицу при их некотором количестве к силе давления на одиночную частицу ($P_0=1,816 \cdot 10^{-4}$ Н), получены диапазон изменения относительной силы давления на частицу.

Максимальная относительная сила давления на частицу в воздуховоде зависит от количества частиц и их взаимного расположения (рисунок 11).

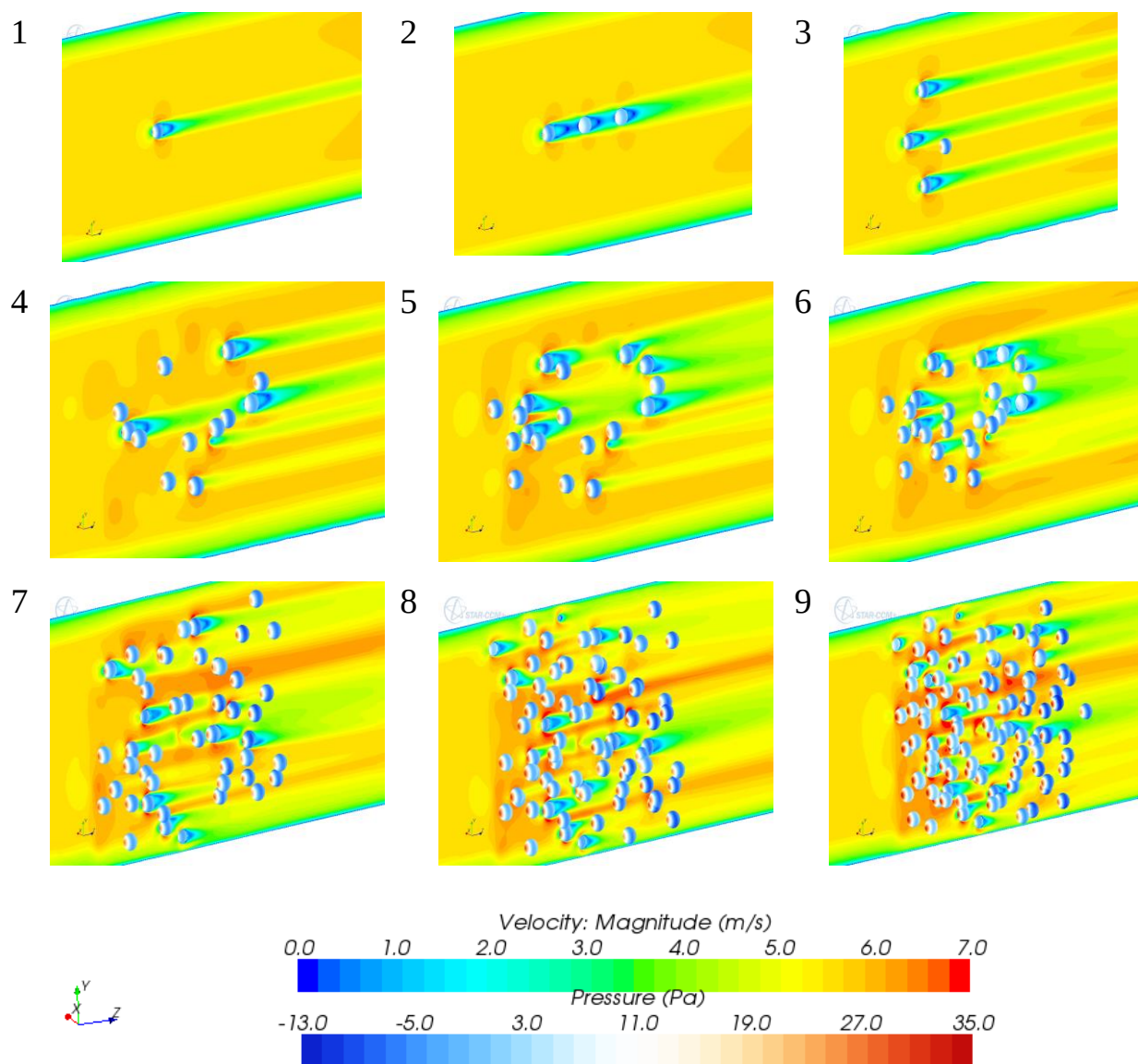


Рисунок 10 – Поля скоростей воздуха и давления на частицы

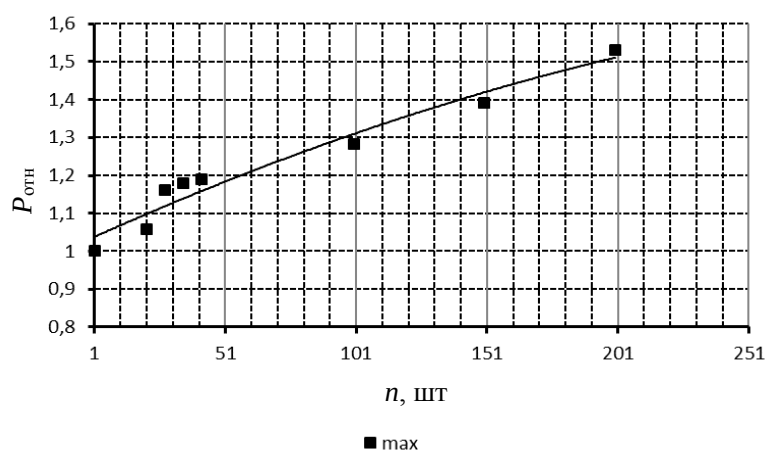


Рисунок 11 – Изменение максимальной относительной силы давления на частицу в зависимости от количества хаотично расположенных частиц

Оценка результатов исследования позволяет сделать вывод, что с ростом количества частиц, скорость воздуха в живом сечении увеличивается от 5 м/с до 7 м/с при неизменных исходных данных. Полученные результаты использованы при определении силы давления на частицы для разработки численной динамической модели скорости витания твердых частиц, учитывающей силу тяжести частиц.

4. Разработана численная модель для определения скорости витания твердых частиц различных размеров, плотности и концентрации, позволяющая рассчитать скорости витания в реальных условиях систем обеспыливания

Для расчета скорости витания твердых шарообразных частиц в вертикальном воздуховоде использована система уравнений (5 – 7), дополненная дискретными методами, основанными на подходе Лагранжа (8). При моделировании методом дискретных элементов (DEM) изучаемая система представлена в виде взаимодействующих частиц сферической формы. Для каждой частицы решена динамическая задача, включающая определение действующих сил и траектории движения. В настоящем исследовании гранулированный материал представлен в виде совокупности обособленных упругих частиц сферической формы. Общий вид уравнения сохранения импульса для материальной частицы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 m_p \frac{dv_p}{dt} &= F_s + F_b, \\
 F_s &= F_d + F_p, \\
 F_b &= F_g + F_c, \\
 F_c &= \sum_{n.p.} F_c + \sum_{n.b.} F_c, \\
 \frac{d}{dt} L_p &= \frac{d}{dt} (I_p \omega_p) = \sum_{n.p.} T_c + \sum_{n.b.} T_c, \\
 T_c &= r_c \cdot F_c - \mu_r |r_c| \|F_c\| \frac{\varpi_p}{|\varpi_p|},
 \end{aligned} \tag{8}$$

где F_s – силы, действующие на поверхность частицы; F_b – массовые силы, действующие на частицу; F_d – сила сопротивления; F_p – сила давления; $F_g = m_p g$ – сила тяжести; F_c – дополнительные силы взаимодействия частиц с другими частицами ($n.p.$) и с границами области ($n.b.$); L_p – угловой момент частицы; I_p – момент инерции частицы; T_c – крутящий момент отдельной частицы, возникающий в результате действия силы взаимодействия, приложенной на частицу в точке, отличной от центра тяжести частицы; r_c – является вектором от центра тяжести частицы к точке контакта; μ_r – коэффициент трения качения; ϖ_p – угловая скорость вращения частицы.

Построена трехмерная модель установки (рисунок 12.а). Для качественного описания криволинейной геометрии установки использовалась сетка с много-

гранными ячейками, количество ячеек в расчетной сетке 584 тыс. Вблизи стенок трубы сделаны призматические слои с соответствующим сгущением к поверхностям (рисунок 12.б).

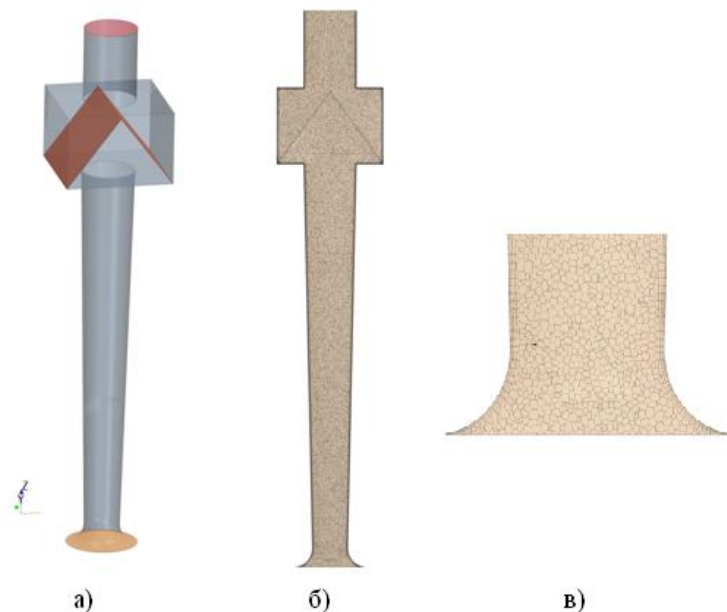


Рисунок 12 – Трехмерная модель установки (а), расчетная сетка установки (б), фрагмент расчетной сетки лемнискаты (в)

В качестве исходных данных приняты физические параметры воздуха, скорости на входе и выходе, соответствующие результатам экспериментальных исследований автора при различных количестве, размерах и плотности частиц шарообразной формы. Шаг расчета по времени составил 0,005 с. Для перехода от дифференциальных к дискретным уравнениям применены метод конечных объемов и модель дискретных элементов. При проведении численного эксперимента выполнена оценка сходимости, расчет считался законченным при достижении стационарности скорости витания. Результаты численного моделирования приведены на рисунке 13 в виде полей скоростей воздуха и витания частиц. В таблице 1 приведено сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных исследований.

Таблица 1

Сравнение результатов экспериментальных исследований и численного моделирования

Диаметр, м	Плотность, кг/м ³	Скорость витания, м/с, полученная		Рисунок
		численным методом	экспериментальным методом	
0,005	400	7,9	9,1	
0,005	800	9,73	9,85	
0,01	400	10,1	11,38	13.а – 13.б
0,01	800	13,5	11,9	13.в – 13.г

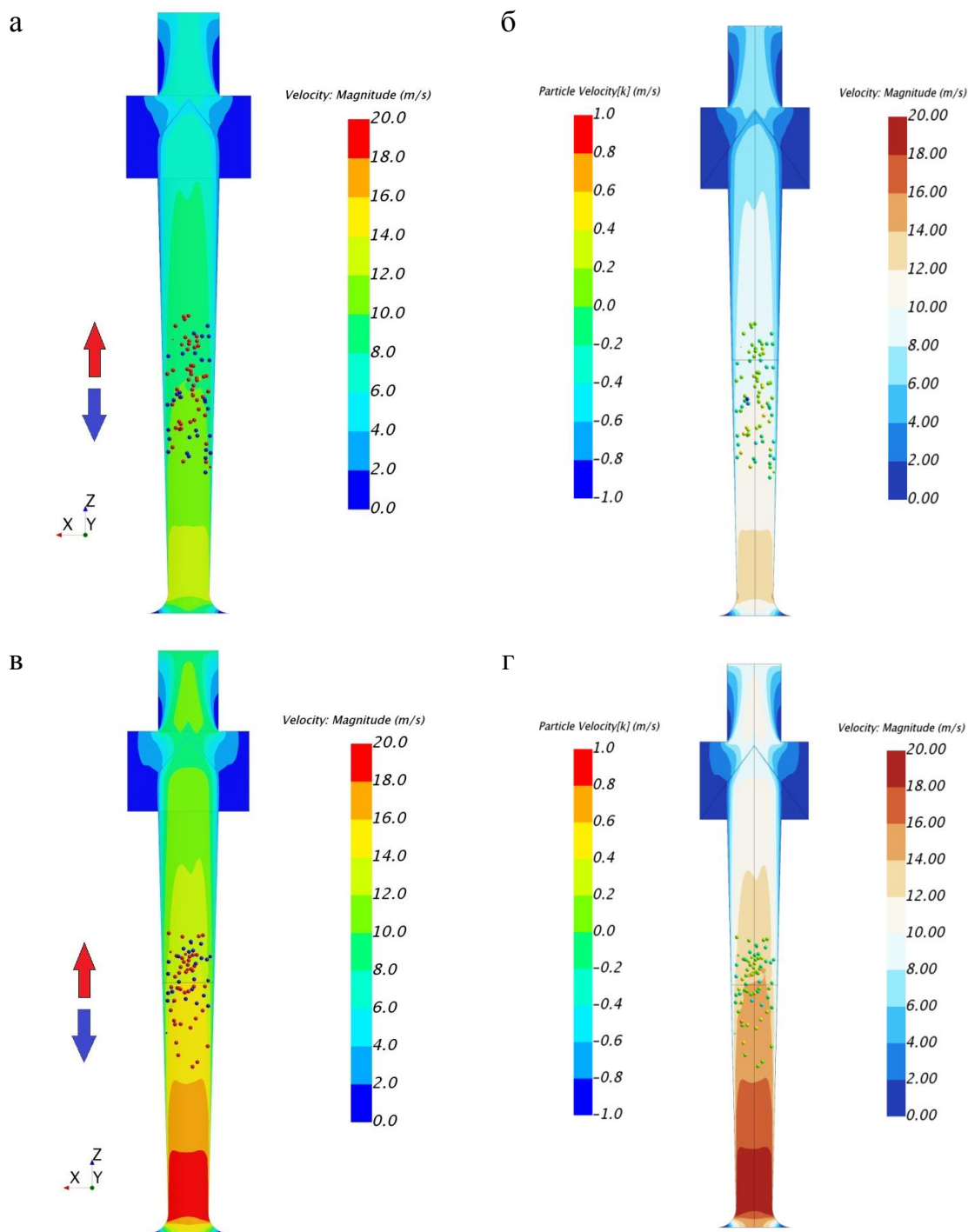


Рисунок 13 –Поля скоростей воздуха (а, в). Поля скоростей частиц (б, г)

Анализ данных подтверждает адекватность численной модели экспериментальным данным.

Результаты численного моделирования дают возможность спрогнозировать скорости витания в реальных условиях эксплуатации систем обеспыливающей вентиляции. Разработанная модель может быть использована для построения численных моделей скорости витания твердых частиц произвольной формы.

5. Разработаны программы расчета вакуумных систем обеспыливания по определению диаметров воздуховодов и подбору оборудования систем всасывающего пневмотранспорта

На основании обобщения данных экспериментальных исследований и численного моделирования разработаны компьютерные программы:

- для определения диаметров воздуховодов, расчета расхода воздуха и потерь давления в системах вакуумной пылеуборки;
- для подбора насосов для систем всасывающего пневмотранспорта (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ №2015619490).

Исходными данными для проектирования и расчета систем вакуумной пылеуборки принимаются:

- физико-механические характеристики транспортируемого материала;
- скорость транспортирования материала;
- требуемая производительность установки;
- места загрузки и разгрузки материала;
- схема системы;
- количество одновременно работающих постов;
- материал трубопроводов.

При отсутствии данных по скорости транспортирования расчет выполняется с использованием формулы (4) и значений скорости витания, полученных по формулам (1) или (2), а также по результатам численного моделирования.

Программа позволяет получить значения расхода воздуха и потерь давления в системе при различных диаметрах воздуховодов. Результаты расчетов используются как исходные данные для программы определения мощности вакуумного насоса.

Для исключения ошибок при проектировании пневмотранспортных систем на этапе выбора вакуумных насосов использован метод выбора рационального полинома. Разработан алгоритм процесса выбора насосов по множеству параметров с заменой реальных объектов их математической моделью в виде полиномов n -й степени.

Аэродинамические характеристики насосов фирм Wieland, DISAB, Sibilia заменены уравнениями регрессии. Для каждого насоса исследовано три уравнения регрессии: линейное, полиномом 2-й и 3-й степени. Выполнено ранжирование этих уравнений по сумме квадратов разности или коэффициенту детерминации (таблица 2).

Таблица 2

Ранжирование уравнений регрессии

Уравнение регрессии	Линейное	Полином 2-й степени	Полином 3-й степени
Коэффициент детерминации	0,9937	0,9986	0,9987
Сумма квадратов разности	51390,78	23365,43	463527,20
Ранжирование	3	1	2

Исходя из анализа ранжирования, выбрано уравнение регрессии полинома 2-й степени. Подобное ранжирование проведено для всех насосов.

Программа по подбору вакуумных насосов обеспечивает достаточно точный и быстрый подбор насосов для систем пневмотранспорта.

III. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе результатов полного трехфакторного эксперимента, выполненного на разработанной экспериментальной установке, получена обобщающая зависимость, которая учитывает влияние размера частицы, плотности материала и массовой концентрации на величину скорости витания.

2. В результате обработки экспериментальных значений скорости витания совокупности (группы) частиц получено критериальное уравнение вида $Re_k = f(Ar, \mu_p)$, позволяющее решать широкий круг задач в области аспирации и пневмотранспорта.

3. Разработана численная модель взаимодействия потока воздуха с неподвижными твердыми частицами в воздуховоде с использованием $k-\varepsilon$ модели турбулентности для определения аэродинамических характеристик (давление на частицу, скорость движения воздуха) в воздуховоде, используемых для разработки численной модели скорости витания твердых частиц.

4. Разработана численная модель процесса витания твердых частиц с применением модели дискретных элементов. Результаты численного моделирования дают возможность спрогнозировать скорости витания в реальных условиях эксплуатации систем обеспыливающей вентиляции. Разработанная модель может быть использована для построения численных моделей скорости витания твердых частиц произвольной формы.

5. Установлено соответствие скоростей витания твердых частиц, полученных в результате экспериментальных исследований и численного моделирования. Данные могут быть использованы для расчета систем аспирации и пневмотранспорта.

6. Исследования движения частиц материала в наклонном воздуховоде позволили получить скорости транспортирования и потери давления для двухфазных потоков при углах наклона α от 0° до 90° и зависимости скорости транспортирования в наклонном и горизонтальном воздуховодах от скорости витания и угла наклона. На основании экспериментальных исследований транспортирования частиц получена критериальная зависимость $Fr_k = f(Re_{вит}, \alpha)$.

7. Разработаны программа расчета воздухопроводов и программа подбора оборудования систем всасывающего пневмотранспорта (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ №2015619490).

Перспективы дальнейших исследований заключаются в развитии методов численного моделирования для определения аэродинамических характеристик двухфазных потоков с твердыми частицами произвольной формы.

IV. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации.

1. Мартянова, А.Ю. Пневмотранспорт полидисперсных частиц [Текст] / И.И. Суханова, А.Ю. Мартянова // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – №3 (20). – С. 55–58. (0,25п.л./0,13п.л.).

2. Мартянова, А.Ю. Снижение запыленности воздуха рабочей зоны цементных заводов [Текст] / И.И. Суханова, А.Ю. Мартянова // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 3 (28). – С. 87-92. (0,4п.л./0,2п.л.).

3. Мартянова, А.Ю. Определение скорости витания монодисперсных строительных материалов по данным экспериментальных исследований / И.И. Суханова, А.Ю. Мартянова // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 5 (52). – С. 186-190. (0,3п.л./0,16п.л.).

4. Мартянова, А.Ю. Численное моделирование воздействия воздушного потока на шарообразные частицы в воздуховоде круглого сечения [Электронный ресурс] / А.Ю. Мартянова // Электронный научный «Современные проблемы науки и образования». – 2015. – № 2. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/129-22466> (дата обращения: 30.10.2015). (0,44п.л.).

5. Мартянова, А.Ю. Влияние массовой и объемной концентрации на скорость витания твердых частиц [Текст] / А.Ю. Мартянова // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2 (55). – С. 143–147. (0,3п.л.).

6. Мартянова, А.Ю. Развитие численных методов расчета систем вакуумной уборки [Текст] / А.Ю. Мартянова, А.Н. Колосницын // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 6 (59). – С. 151–155. (0,3п.л./0,2 п.л.).

Статьи в других изданиях

7. Мартянова, А.Ю. Движение пористых частиц в потоке воздуха [Текст] / А.Ю. Мартянова // Актуальные проблемы современного строительства: сборник материалов 62-й Международной научно-технической конференции молодых ученых/ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – в 5 ч. ч. III. – СПб, 2009. – С. 130–133. (0,25п.л.).

8. Мартянова, А.Ю. Влияние размера и плотности частиц на скорость витания, трогания и транспортирования [Текст] / И.И. Суханова, А.Ю. Мартянова // Доклады 67-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – в 5 ч. ч. I. – СПб, 2010. – С. 82 –85. (0,25п.л./0,13п.л.).

9. Мартянова, А.Ю. Снижение запыленности воздуха рабочей зоны на силосах цементных заводов [Текст] / И.И. Суханова, А.Ю. Мартянова // Доклады 68-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных ра-

ботников, инженеров и аспирантов университета / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – в 5 ч. ч. II. – СПб, 2011. – С. 146–148. (0,19п.л./0,1п.л.).

10. Мартянова, А.Ю. Вопросы совершенствования методов пылеуборки и пневмотранспорта на предприятиях стройиндустрии [Текст] / И.И. Суханова, А.Ю. Мартянова // Инженерно-экологические системы: материалы Международной научно-практической конференции 10-12 октября 2012г. / под общей редакцией Т.А. Дацюк; СПбГАСУ. – СПб., 2012. – С. 121–124. (0,25п.л./0,13п.л.).

11. Мартянова, А.Ю. Экспериментальное определение действительной скорости витания [Текст] / И.И. Суханова, А.Ю. Мартянова // Актуальные проблемы архитектуры и строительства: материалы V Международной конференции 25-28 июня 2013 г. / под общей редакцией Е. Б. Смирнова; СПбГАСУ. – В 2 ч. ч. II. – СПб., 2013. – С. 53–56. (0,25п.л./0,13п.л.).

12. Мартянова, А.Ю. Зависимость скорости витания частиц от их размеров [Текст] / А.Ю. Мартянова, А.В. Агеев, И.В. Папсуевич // Актуальные проблемы строительства: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / СПбГАСУ. – В 5 ч. ч. I. – СПб., 2014. – С. 166–168. (0,19п.л./0,06п.л.).

13. Мартянова, А.Ю. Выбор мощности вакуумного насоса в системах пневмотранспорта [Текст] / А.Ю. Мартянова, М.М. Царегородцев // Актуальные проблемы строительства: материалы 68-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / СПбГАСУ. – В 2 ч. ч. I. – СПб., 2015. – С. 196–199. (0,25п.л./0,13п.л.).

14. Мартянова, А.Ю. Подбор мощности вакуумного насоса в системах пневмотранспорта [Текст] / И.И. Суханова, А.Ю. Мартянова: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Российская Федерация №2015619490; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 04.09.2015.