

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

*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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
Суханова Инна Ивановна

Санкт-Петербург – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ И ПНЕВМОТРАНПОРТА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЦЕМЕНТА И СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ.....	12
1.1 Пыль как один из основных вредных производственных факторов производства цемента и сухих строительных смесей .....	12
1.2 Основные источники образования отходов и просыпей при производстве сухих строительных смесей и на цементных заводах .....	15
1.3 Особенности систем удаления пыли на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей .....	23
1.4 Анализ существующих методов расчета систем всасывающего пневмотранспорта и аспирации .....	28
1.4.1 Скорости витания, трогания, транспортирования в системах пневмотранспорта .....	28
1.4.2 Концентрация аэроsmеси.....	44
1.4.3 Характер движения частиц материала в вертикальных и горизонтальных воздуховодах.....	46
1.4.4 Характер движения частиц материала в наклонных воздуховодах .....	50
1.5 Выводы по главе 1 .....	53
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ ВИТАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ .....	55
2.1 Экспериментальная установка для определения скорости витания твердых частиц .....	55
2.2 Методика проведения экспериментов .....	63
2.3 Проведение полного трехфакторного эксперимента .....	71
2.4 Обработка экспериментальных данных.....	73

2.5 Экспериментальные исследования движения пылевоздушного потока в наклонном воздуховоде .....	87
2.6 Выводы по главе 2.....	93
ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ВОЗДУХОВОДЕ .....	95
3.1 Построение модели обтекания твердых частиц потоком воздуха .....	95
3.2 Численное моделирование скорости витания .....	106
3.3 Выводы по главе 3.....	118
ГЛАВА 4 РАСЧЕТ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ И ЦЕМЕНТА.....	120
4.1 Программа расчета воздуховодов при проектировании вакуумной системы обеспыливания .....	120
4.2 Программа подбора мощности вакуумного насоса при проектировании систем аспирации и пневмотранспорта .....	128
4.3 Экономическая оценка выполненных исследований .....	135
4.4 Выводы по главе 4.....	138
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ .....	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	141
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	155

## Условные обозначения:

$V$  – объем, м<sup>3</sup>;  
 $D$  – диаметр трубопровода, м;  
 $S$  – площадь, м<sup>2</sup>;  
 $G$  – массовый расход материала, кг/ч;  
 $w$  – скорость, м/с;  
 $p$  – давление, Па;  
 $\mu'$  – объемная концентрация смеси, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu$  – массовая концентрация, кг/кг;  
 $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $h$  – высота подъема транспортируемого материала, м;  
 $d$  – диаметр частицы, м;  
 $c$  – опытный коэффициент сопротивления;  
 $\alpha$  – угол, град;  
 $\Delta$  – перепад;  
 $t$  – время, с.

## Индексы:

вит ( вит.ч) – витание одиночной частицы;  
 вит.гр – витание группы частиц;  
 тр – трогания;  
 т – транспортирования;  
 г – газа;  
 ч – частицы твердой фазы, материала;  
 ш – шар;  
 м – миделево сечение;  
 экв – эквивалентный;  
 трен – трения;  
 сф – сферичности;  
 с – сеть;  
 р – расчетная;  
 гор – горизонтальный;  
 э – экспериментальный;  
 к – критериальный.

## Критерии подобия:

$Ar$  – критерий Архимеда;  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $Fr$  – критерий Фруда.

## ВВЕДЕНИЕ

**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 пылевыделением. Пылеобразование объясняется наличием в сыпучем материале пылевидных фракций, способных находиться определенное время во взвешенном состоянии. Наиболее крупные частицы пыли оседают на полу и вблизи источников ее образования. Мелкие фракции частиц пыли, увлекаемые воздушными потоками, разносятся по помещению и загрязняют поверхности строительных конструкций и оборудования. Основным способом удаления пыли на предприятиях является устройство местной вытяжной вентиляции (аспирации), но, как показывает анализ исследований, отсутствие технической возможности полной герметизации пылящего оборудования обуславливает недостаточно эффективную работу местной вентиляции. 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 повышении эффективности и надежности работы технологического оборудования, но и на создании благоприятных условий труда.

Существующие методы уборки пыли и просыпей (ручная, сжатым воздухом) приводят к вторичному пылеобразованию.

Наиболее эффективным является вакуумный способ сбора пыли и просыпей, который 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 могут быть возвращены в технологический процесс.

Несмотря на отмеченные достоинства, системы вакуумной уборки не нашли еще широкого распространения на заводах строительных материалов. Зачастую отсутствуют необходимые для расчета систем аэродинамические характеристики такие, как скорости витания и транспортирования перемещаемого конкретного материала. Это приводит к ошибкам при проектировании систем вакуумной уборки, подборе оборудования и, как следствие, недостаточно эффективной их работе. Широко используемые в настоящее время численные методы расчета позволяют получить вышеуказанные характеристики для различных газодинамических систем.

Таким образом, проведение экспериментальных и аналитических исследований, которые направлены на совершенствование 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, Е.А. Штокмана 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**:

1. Проанализировать результаты отечественных и зарубежных исследований в области обеспыливающей вентиляции;
2. Разработать схему и смонтировать экспериментальную установку для изучения движения частиц в потоке воздуха;
3. Выполнить экспериментальные исследования скорости витания твердых частиц с различной массовой концентрацией, плотностью и размерами;
4. Получить зависимость скорости витания твердых частиц от концентрации, плотности и размеров;
5. Разработать численные модели взаимодействия потока воздуха с неподвижными твердыми частицами в воздуховоде и процесса витания твердых частиц;
6. Выполнить сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными исследованиями;
7. Выполнить экспериментальные исследования скоростей транспортирования твердых частиц по наклонному и горизонтальному трубопроводу и получить зависимость скорости транспортирования от скорости витания и угла наклона;
8. 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 рассчитать 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 новая компьютерная программа «Подбор мощности вакуумного насоса в системах пневмотранспорта» (свидетельство о государственной регистрации № 2015619490 04 сентября 2015года);

– 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, вносимые на защиту:**

– новые зависимости скорости витания твердых частиц от диаметра, плотности и концентрации;

– зависимости скорости транспортирования твердых частиц в наклонном и горизонтальном воздуховодах 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 воздуховодов 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 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».

### **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; правомерностью 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.).

Результаты диссертационного исследования были апробированы в ООО «АЖИО» (г. Санкт-Петербург), ООО «Гидроцем» (г. Пушкин), Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете. Организациями представлены акты о внедрении научных результатов.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 научных 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, 1 зарегистрированной программы для ЭВМ.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав с выводами по каждой из них, общих выводов, содержит 154 страницы учитываемого печатного текста и четырех приложений, 25 таблиц, 49 рисунков и список литературы из 134 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

# **ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ И ПНЕВМОТРАНПОРТА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЦЕМЕНТА И СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ**

## **1.1 Пыль как один из основных вредных производственных факторов производства цемента и сухих строительных смесей**

Производство сухих строительных смесей и цемента характеризуется целым рядом вредных производственных факторов, оказывающих отрицательное влияние на здоровье работающих. Но одним из наиболее опасных вредных производственных факторов для здоровья человека является пыль, вызывающая заболевания пылевой этиологии. Это подтверждается исследованиями, проведенными на заводе «АЖИО» по производству сухих строительных смесей, на предприятии «Гидроцем» по производству гидроизоляционных и ремонтных составов на основе цемента, цементных заводах при выяснении уровня заболеваемости рабочих наиболее запыленных цехов.

Стандартизированные показатели заболеваемости показывают, что самый высокий уровень заболеваемости органов дыхания характерен для рабочих цеха помола цемента. На заводе по производству сухих строительных смесей «АЖИО» и предприятии «Гидроцем» самый высокий уровень заболеваемости наблюдается на рабочих местах с использованием ручного труда. Эти заболевания в основном являются профессиональными, основную долю, которых составляют пылевые бронхиты, пневмокониозы. Воздействие пыли на органы зрения приводит к воспалительным процессам – конъюнктивитам. Раздражающее действие пыли на кожу вызывает дерматиты.

Заболеваемость рабочих обусловлена наличием технологических процессов по переработке сырья и готовой продукции, связанных со следующими операциями: загрузка, выгрузка, дробление, перемешивание, транспортирова-

ние и т.д. Эти операции сопровождаются интенсивным выделением пыли в рабочую зону, являющейся опасной, так как в химический состав сырьевых материалов входит двуокись кремния  $\text{SiO}_2$ .

Твердые загрязнения наряду с двуокисью кремния содержат и другие фиброгенные компоненты, такие как уголь, оксиды алюминия, магния, железа и других металлов. В таблице 1.1 приведены химические составы материалов и клинкера, применяемых на заводах по производству сухих строительных смесей и цементных заводах [10, 86, 101].

Кроме химического состава на опасность пыли оказывает влияние ее дисперсный состав. Дисперсность – важнейшая характеристика пыли, которая подразумевает содержание в ней частиц различной крупности. Согласно литературным данным [116-118] размеры частиц различных пылей лежат в интервале: от  $10^{-7}$  до  $10^{-1}$  см.

На рисунке 1.1 представлена классификационная номограмма [43, 84, 86], построенная в вероятностно-логарифмической системе координат. Штрихпунктирными линиями показаны границы зон пяти классификационных групп пылей:

I – очень крупнодисперсная пыль;

II – крупнодисперсная пыль (например, мелкозернистый песок для строительных растворов);

III – среднедисперсная пыль (например, цемент);

IV – мелкодисперсная пыль (например, кварц молотый пылевидный);

V – очень мелкодисперсная пыль.

Как показали исследования в области оценки влияния на организм человека дисперсного состава пыли, наибольшую опасность в развитии болезней пылевой этиологии представляет мелкодисперсная пыль размером до 10 мкм. Частицы пыли размером 5 мкм и меньше способны проникать глубоко в легкие. Частицы размером 5-10 мкм в основном задерживаются в верхних дыха-

тельных путях. В легкие такие частицы попадают в незначительном количестве. Пылинки размером более 10 мкм практически не проникают в легкие, задерживаясь в верхних дыхательных путях [43].

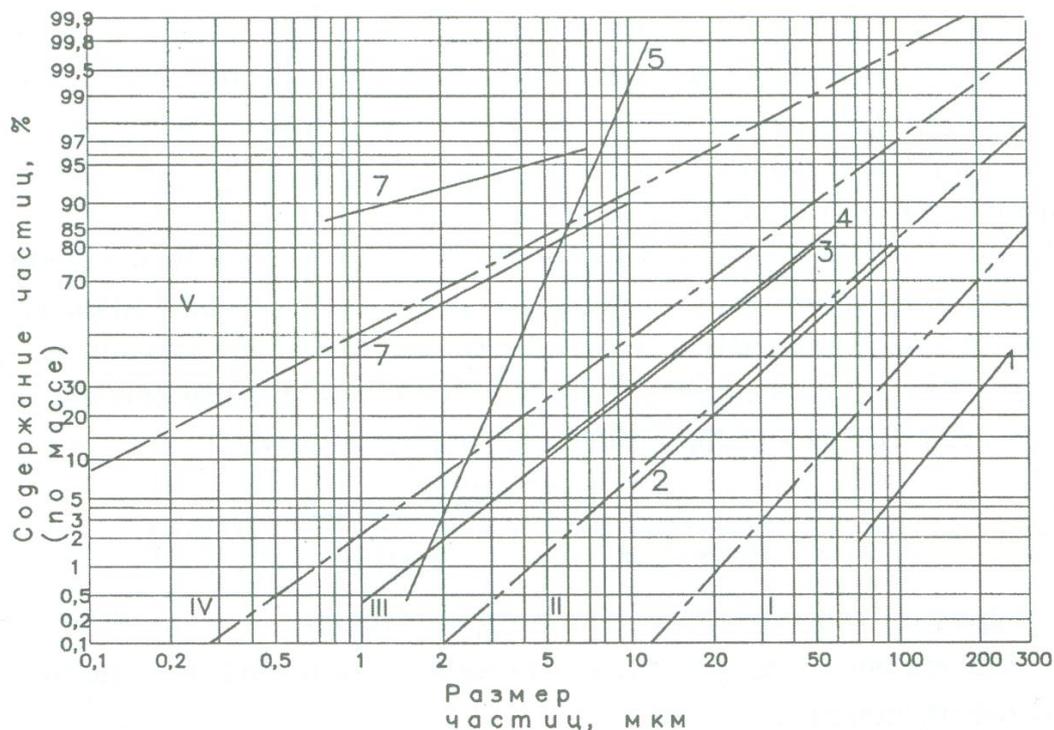


Рисунок 1.1 – Классификационная номограмма: I-V – классификационные группы пылей по их дисперсности; 1 – уголь, измельченный в шаровой мельнице; 2 – мелкозернистый кварцевый песок; 3 – пылевидный кварц; 4 – цемент; 5 – пыль, применяемая при испытаниях лабораторией ЦНИИПромзданий; 7 – атмосферная пыль

Таблица 1.1 – Химические составы некоторых сырьевых материалов и клинкера

Материал	Содержание (масс. %)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
применяемых в производстве цемента										
Фосфогипс	0,5	0,6	0,2	-	-	-	-	44,3	32,5	1,6
Нефелиновый шлам	31,91	3,72	2,11	1,08	1,05	1,47	0,27	0,16	0,21	0,52
Клинкер	22,15	4,54	3,36	1,25	0,60	0,66	0,32	0,23	64,21	-
Гидрогранатовый шлам	0,01-0,15	24,91-24,60	0,16	0,72-0,70	-	5,84-5,75	-	-	38,31-37,72	-
применяемых в производстве сухих строительных смесей										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Песчаная пыль	95	0,44	0,75	0,85	-	0,82	-	-	0,7	-
Известь	-	-	-	5	-	-	-	-	60	-
Гипс	0,04-1,68	0,02-0,42	0,01-0,04	0,28-4,26	-	-	-	-	31,7-36,7	-
Цемент	20,81	5,64	2,46	2,74	-	-	-	2,7	63,15	-

В цехах вышеуказанных заводов благодаря значительному разнообразию технологических операций образуется пыль различного происхождения и широкого диапазона размеров [52]. Так, «фракционный состав пыли по результатам дисперсного анализа, содержащийся в аспирационном воздухе сырьевой мельницы цементного завода», представлен в таблице 1.2 [72, 81].

Проведенные анализы дисперсного состава пылей в воздухе рабочих зон основных участков показал наличие в составе витающей пыли значительного количества частиц размером менее 10 мкм (содержание фракций размером менее 5 мкм до 30-40 %).

Таблица 1.2—Фракционный состав пыли в аспирационном воздухе сырьевой мельницы

Размер частиц, мкм	5-10	10-20	20-40	40-60	60
Содержание фракций, %	24	10	15	4	9

В соответствии с санитарными нормами ГН ПДК [96] пыли в воздухе рабочей зоны производственных помещений цементных заводов и заводов по производству сухих строительных смесей не должна превышать  $6 \text{ мг/м}^3$ . Процессы движения и перегрузки сырья и цемента сопровождаются значительными пылевыделениями в рабочую зону. При этом концентрация в воздухе рабочей зоны может превышать ПДК в несколько раз (от 0,5 до  $15 \text{ мг/м}^3$ ) даже при нормальной работе оборудования без аварийных ситуаций.

### **1.2 Основные источники образования отходов и просыпей при производстве сухих строительных смесей и на цементных заводах**

При производстве сухих строительных смесей и цемента [4, 22, 49, 71, 85, 95, 99] выделяются в основном твердые загрязняющие вещества [10], некоторая часть которых переходит в отходы и просыпи, являющиеся интенсивным источником вторичного образования пыли [76].

Согласно данным работы [8] при получении 1 т клинкера по наиболее распространенному в нашей стране мокрому способу производства в окружающую среду поступает до 6800 м<sup>3</sup> газов, включая СО<sub>2</sub> (основной парниковый газ) и другие вредные газообразные компоненты. Кроме того, с газами выбрасывается пыль. Так, для производства 1 т цемента необходимо раздробить, обжечь и перевезти почти 3 т исходного кускового или грубо измельченного материала, который в процессе производства полностью превращается в мелкую пыль [86].

На предприятиях по производству сухих строительных смесей в качестве исходного сырья широко применяются мелкодисперсные материалы. Источниками интенсивного пылеобразования являются [76]:

- перегрузка сыпучих материалов;
- дробильно-помольные операции;
- транспортирование сыпучих материалов;
- заполнение материалом емкостей и силосов;
- работа основного технологического оборудования (смесителей, мельниц, питателей и др.).

Наиболее интенсивным источником выделения пыли следует считать узлы перегрузки материала – с конвейера в технологическое оборудование, из одного оборудования в другое.

Наряду с первичным пылеобразованием в результате механической переработки материалов происходит вторичное пылеобразование. Оно является результатом поступления в воздух пыли, осевшей на строительных конструкциях и поверхностях оборудования, вследствие вибрации оборудования, передвижения механизмов, людей, транспорта и при уборке помещений цеха. Кроме того, дополнительным источником пылеобразования служит также значительное количество просыпи, которая скапливается под ленточными транспортерами.

Сырье для производства цемента – это известняк, силикаты, алюминаты кальция, сланец, мергель, нефелиновый шлам, доменный шлак, клинкер, зола, гипс, угольная пыль, кокс и руда.

При обжиге (во вращающихся печах) размолотых кальциевых мергелей и известняка, грунта, карбоната кальция и других добавок (угольной пыли, кокса и т.д.) получают цементный клинкер, либо сухим методом, либо мокрым после флотации в воде. Клинкер обжигают в шахтных печах, а затем охлаждают, размалывают и смешивают с различным количеством добавок (доменный шлак, алебастр и прочее) для получения цемента различных марок.

Источники пыли на цементных предприятиях можно разделить на две группы. Первая, более значимая, включает в себя технологические процессы, куда входят вращающиеся и шахтные печи, охладители клинкера, сырьевые и цементные мельницы, сушилки шлама. Вторая группа состоит из узлов хранения и транспорта, источники которых оказывают вредное воздействие в основном на атмосферу предприятия и его ближайших окрестностей. Это хранилища сухих материалов – клинкера и шлама, а также связанные с ними обработка, транспортировка и их складирование. Следует отметить, что особо серьезные проблемы вызывают транспортировка, погрузочные бункеры, элеваторы и ленточные конвейеры, хотя выбросы от них и малы из-за близости этих источников к земле.

На цементных предприятиях имеются следующие источники загрязнения воздуха (по стадиям производства):

При подготовке сырья: дробилки; барабанные сушилки; мельницы; система транспортировки; хранилища; стадия грануляции.

При обжиге клинкера: вращающиеся и шахтные печи; охладители клинкера; система его транспортировки; хранилища клинкера.

При производстве цемента: подготовка гипса; цементные мельницы; система транспортировки цемента.

При отгрузке: хранилища цемента; фасовочные машины; склады; система транспортирования мешков.

Производство цемента может быть организовано по «сухой», «мокрой» или смешанной технологическим схемам [4, 22, 49, 71, 85, 95, 99]. Очевидно, что крупным источником пылевых выбросов является сухая схема. Гораздо более благоприятна для эффективного пылеотделения – мокрая схема, дающая вследствие увлажненности материалов меньшие концентрации пылевых выбросов и значительно меньший их суммарный уровень. Однако более экономичным, производительным и, следовательно, чаще применяемым (особенно на новых предприятиях) является сухой способ.

На рисунке 1.2 изображена технологическая схема производства цемента по мокрому способу. В принципе, основные технологические стадии сухого способа аналогичны. За исключением отсутствия подачи воды в операции размола и замены пульпохранилища силосом сухого сырья.

Рассмотрим отдельные источники твердых выбросов на цементных предприятиях.

*Дробилки.* На цементных предприятиях сырье, поступившее из карьера, подвергается дроблению. Количество образующейся при этом пыли зависит от вида материала, а также от его крупности и влажности. Пыль из воздуха обычно удаляют с помощью высокоэффективных циклонных сепараторов или рукавных фильтров. Если обрабатывается влажный материал, то выбросы пыли невелики, но возрастает, особенно в холодные дни с повышенной влажностью, опасность забивки циклонов и фильтров. Следовательно, стадия разделения либо полностью изолируется, либо, по крайней мере, располагается в закрытом помещении.

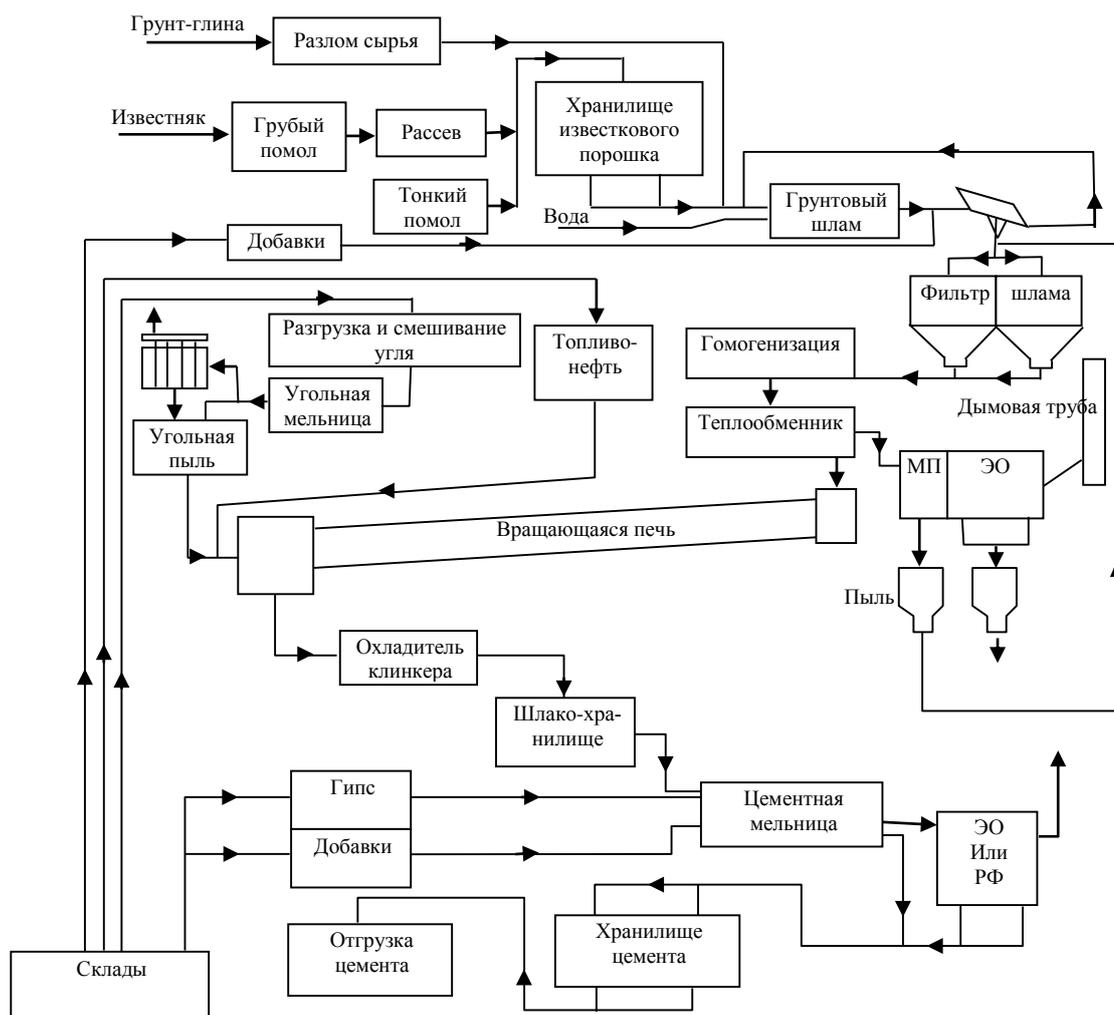


Рисунок 1.2 – Технологическая схема производства цемента

*Сушилки и мельницы для сырья и угля.* В мельницах и сушилках сырье и уголь подвергаются размолу и сушке горячим воздухом. Существуют различные конструкции этого оборудования. В зависимости от особенностей конструкций варьируется концентрация пыли в газе, но в целом она довольно высока (в сушилках –  $200 \text{ г/м}^3$ ). Как правило, для удаления пыли используют рукавные фильтры, но иногда применяют и циклонные сепараторы. Поскольку температура газа, выходящего из мельниц, обычно составляет около  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , то нет опасности ее снижения до точки росы, соответственно создаются хорошие условия для эксплуатации рукавных фильтров и при тщательном соблюдении технологических параметров нет опасности их забивки. Тем не менее, во из-

бежание падений температуры в зимнее время необходима теплоизоляция питающих трубопроводов и сепаратора. Иногда вместо рукавных фильтров применяют электроосадители.

*Вращающиеся и шахтные печи для обжига клинкера.* В мокром способе производства цемента пульпа, содержащая сырье, подается в печь по трубопроводу и диспергируется в зоне предварительного нагрева с помощью цепей или иных пересекающихся отражательных перегородок либо впрыскивается в нее под давлением через большое количество форсунок. В зоне кальцинации выделяется диоксид углерода и материал обжигается с образованием клинкера.

Пыль, уносимая из печи отходящими газами (концентрация пыли от 30 до 100 г/м<sup>3</sup>), как правило, отделяется в электроосадителях после пылеулавливающей камеры (часть печи) или в циклонном коллекторе. Гранулометрический состав пыли существенно меняется в зависимости от используемого сырья и технологии. В таблице 1.3 приведен пример химического состава пыли из вращающейся печи.

Таблица 1.3 – Пример химических составов пыли из вращающихся печей

Компоненты	Содержание, %
Диоксид кремния SiO <sub>2</sub>	1-22
Оксид алюминия (III) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-12
Оксид железа (III) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-16
Оксид марганца (III) Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05-0,13
Оксид кальция CaO	16-48
Оксид магния MgO	0,5-2,0
Триоксид серы SO <sub>3</sub>	1,6-13,0
Сера S	0,1-0,4
Оксид калия K <sub>2</sub> O	0,5-5,0
Оксид натрия Na <sub>2</sub> O	0,1-5,0
Потери при обжиге (преимущественно диоксид углерода) (CO <sub>2</sub> )	5-35

При сухом способе производства цемента во вращающихся печах с точным теплообменом сухое размолотое сырье перед введением его в печь подается в самый верхний из четырех последовательно соединенных циклонов.

Отделение сырья осуществляется непрерывно, а нагрев его происходит в отдельных коллекторах. Материал температурой 700 °С подается в печь и обжигается в клинкер. Отходящие газы выходят из циклонного теплообменника (их температура составляет 300–350 °С). На современных цементных производствах отходящие газы затем утилизируют в сушилках сырья с последующей их подачей в сепараторы.

Прохождение размолотого сырья через четырехступенчатый циклон с ситовым эффектом существенно увеличивает долю наиболее мелкодисперсных частиц. Следовательно, пыль в отходящих из сепараторов газах оказывается очень мелкая. Более 90 % частиц имеет размер менее 10 мкм и концентрация их значительна (40–70 г/м<sup>3</sup>). Пыль из печных газов и газов после теплообменника обычно отделяют в электроосадителях и рукавных фильтрах. При учете высоких температур, прежде всего, необходимо охладить и увлажнить отходящие газы в сушилке сырья либо в специальных охладителях или стабилизаторах, где газ увлажняется и охлаждается до постоянной температуры 150°С за счет подачи воды через автоматически контролируемые форсунки.

В высокопроизводительных шахтных печах, также, как и в простых шахтных печах, применяются либо окомкованные, либо гранулированные куски, получаемые при смешении размолотого сырья с коксом или углем и определенным количеством воды. Автоматический загрузочный механизм распределяет эту шихту равномерно по всей площади печи. Содержание пыли в отходящих газах зависит от фильтрующей способности увлажненного слоя комков или гранул, лежащих выше зоны обжига.

Отходящие газы из меньших по размерам печей очищаются с использованием высокоэффективных циклонов со степенью отделения около 90%. Если можно установить примерно постоянную температуру отходящих газов, то возможна эксплуатация электроосадителей или рукавных фильтров, хотя вследствие повышенной влажности отходящих газов все же придется применять стабилизатор.

Обожженный во вращающихся или шахтных печах клинкер охлаждается в барабанных или решетчатых охладителях. Часть отведенного из них воздуха добавляется в печь как вторичный воздух, а остальной используется для сушки, а затем очищается в сепараторах и сушилке.

Температура газов, выходящих из охладителя, находится в пределах от 200 до 250 °С. Концентрация пыли в них существенно колеблется в зависимости от размера частиц клинкера, температуры и количества воздуха, пропускаемого через охладитель. Рукавные фильтры, с помощью которых можно было бы полностью удалить всю пыль в охладителе, применяются лишь изредка, поскольку при нормальных условиях фильтрующий материал быстро изнашивается от воздействия горячей грубодисперсной пыли. Кроме того, температура газов, выходящих из охладителя, также существенно колеблется. Соответственно для удаления пыли из охладителей клинкера применяют высокоэффективные механические сепараторы. Как правило, это коллекторы со слоем гранул либо аналогичные, но более старые типы аппаратов, такие, например, как МВ-фильтры.

Клинкер размалывают в мельницах (обычно в трубчатых), причем с добавлением либо 3 % гипса (при получении портландцемента) либо гипса и доменного шлака (при получении шлако-цемента). Обычно после использования мельницы устанавливают сортирующее сито. Для удаления пыли из воздуха, выводимого из зоны работы мельниц, чаще всего применяют рукавные фильтры. В случае использования электроосадителей очищаемый газ подают с впрыском воды, чтобы повысить его влажность и обеспечить полноту парообразования. Вследствие высоких концентраций пыли, перед рукавным фильтром или электроосадителем устанавливают циклонный коллектор.

В число источников пыли входит все оборудование для транспортировки размолотых или других пылесодержащих материалов: ковшовые элеваторы, шнековые и цепные транспортеры, пневмотранспорт, наклонные эста-

кады и перепады конвейеров. Вокруг этого оборудования осуществляют вытяжку и очистку воздуха. При отгрузке цемент либо автоматически фасуется в мешки, либо перевозится в контейнерах.

Силосы для пылящего или молотого материала часто находятся под небольшим избыточным давлением. Следовательно, затворы и аэрационные люки снабжаются простейшими фильтрующими рукавами для предотвращения попадания пыли в окружающий воздух. Для силосов с пневматической загрузкой и оборудования для смешения и транспортировки порошковых материалов используют коллекторы.

Погрузочные бункеры и хранилища предназначены для хранения клинкера, доменного шлака, сырьевых материалов и угля. Если происходит интенсивное выдувание содержащейся в этих материалах пыли, например, из клинкера шахтных печей, то над хранилищем сооружают крышу, а в процессе работы с пылящими продуктами осуществляют из этой зоны вытяжку воздуха для очистки в коллекторе, что обеспечит в ней удовлетворительные условия для работы.

### **1.3 Особенности систем удаления пыли на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей**

Известно, что основным способом удаления пыли на предприятиях, технологический процесс которых связан с переработкой и транспортировкой сыпучих материалов, является устройство местной вытяжной вентиляции. Но, как показывает анализ исследований [52], отсутствие технической возможности полной герметизации пылящего оборудования обуславливает недостаточно эффективную работу местной вентиляции. Иначе говоря, локализовать пылевыведения не удастся, и часть пыли, выделяющейся при производстве и транспортировании, оседает на полу, оборудовании и конструкциях [52]. А так как сыпучие строительные материалы являются слеживающимися материа-

лами [39], то по рекомендациям работы [37] это должно учитываться в методиках расчета пневмотранспортного оборудования. Перед транспортированием слежавшийся материал необходимо разрыхлить до размера 5–15 мм. Кроме того, в процессе переработки сыпучих материалов образуется большое количество просыпи, которая является интенсивным источником вторичного образования пыли. Так, на предприятиях по производству силикатного кирпича у ленточных формовочных аппаратов двусторонней прессовки образуется до 20–30 кг/ч просыпи, у формовочных автоматов карусельного типа – до 30 и более, у ленточных конвейеров подачи силикатной формовочной массы – до 1–2 кг/ (п.м · ч) [76].

Наиболее крупные частицы пыли оседают на полу и вблизи источников ее образования. Мелкие фракции частиц пыли, увлекаемые воздушными потоками, разносятся по помещению и загрязняют поверхности строительных конструкций и оборудования.

Нормальное санитарно-гигиеническое состояние воздушной среды производственных помещений в значительной степени зависит от способа удаления осевшей пыли, эффективности пылеуборочного оборудования и от того, насколько предотвращено повторное поступление пыли, удаляемой с поверхностей, в атмосферу цеха [43].

Существует несколько способов пылеуборки. Широко применяемая сухая ручная уборка метлами и щетками с помощью совков. Однако ручная уборка малопродуктивна и малоэффективна. Она даже повышает уровень запыленности в помещении в среднем в 15 раз. Между периодами уборки запыленность снижается, но все же остаточная концентрация значительно превышает начальную (фоновую).

К аналогичному результату приводит сдувание пыли сжатым воздухом. Путем увлажнения и смывания водой (мокрая уборка) из помещения удаляется 58–76 % пыли. Однако этот способ уборки можно применять далеко не во всех

случаях. Его нельзя использовать при уборке пыли в неотапливаемых помещениях, при очистке технологического, электрического и транспортного оборудования и при уборке пылей, которые взаимодействуют с водой. Кроме того, мокрая уборка требует специальных систем для подвода чистой и отвода загрязненной воды, сооружений и устройств для ее очистки, водостойкое исполнение строительных конструкций, определенного уклона полов и т.д. [34, 43, 52].

Наиболее прогрессивной и эффективной в санитарно-гигиеническом и технико-экономическом отношении, а также свободной от названных недостатков является вакуумная пылеуборка, которая предотвращает вторичное попадание пыли с поверхности в воздушную среду [93, 111]. Данный способ удаляет любую пыль с различных по характеру и назначению поверхностей, а также из труднодоступных для других способов уборки мест и помещений [34]. Удаляемая при уборке пыль собирается в специальных резервуарах и может быть возвращена в технологический процесс. Пневматические пылеуборочные установки могут убирать и более крупные частицы, попадающие в помещение с ленты транспортеров, от оборудования и размер этих частиц достигает 4-6 мм, а в некоторых случаях 10 мм [34]. Вакуумный способ обеспечивает самое высокое качество очистки поверхностей и полное удаление осевшей пыли из помещения. Изменяется и сам характер труда уборщиков [34, 43, 48, 52, 75, 89].

Как ранее рассмотрено в пункте 1.2, в цехе обжига клинкера основным оборудованием являются вращающиеся или шахтные печи. Обожженный в печах клинкер охлаждается в барабанных или решетчатых охладителях (рисунок 1.3) [65].

В обычном режиме работы в цехе обжига клинкера образуется небольшое количество просыпей, но при аварийных ситуациях, например, при остановке электрофильтров, из оборудования выгружается большое количество



В цехе помола цемента клинкер размалывают в мельницах с добавлением либо гипса, либо гипса и доменного шлака в зависимости от марки цемента. Источником пыли является все оборудование цеха (рисунок 1.4).

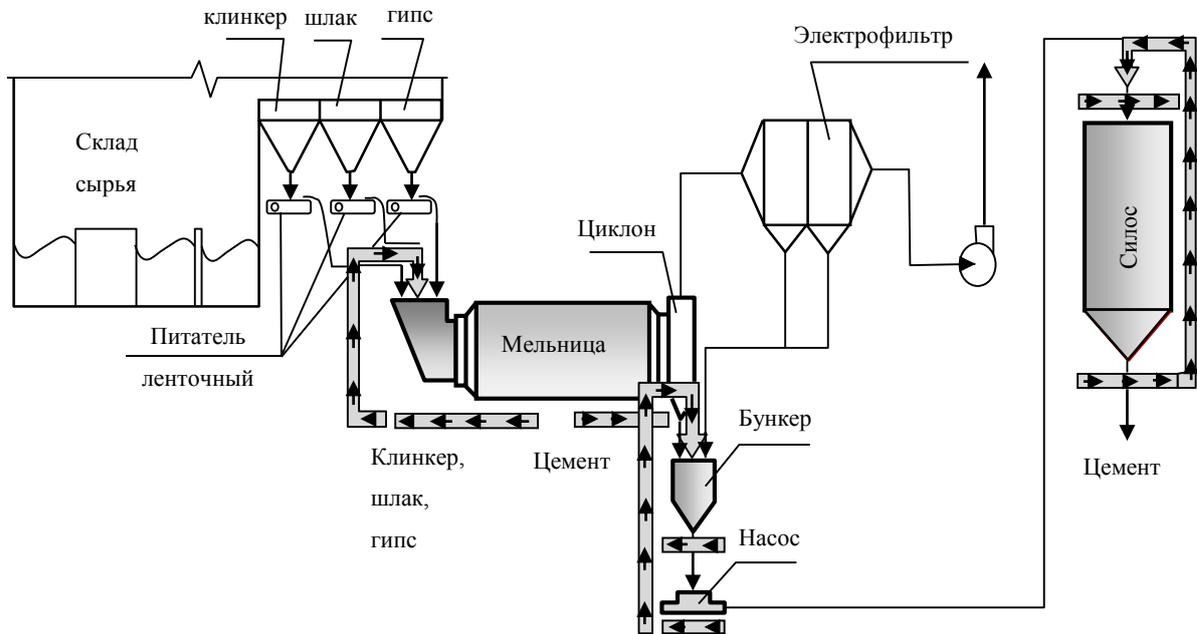


Рисунок 1.4 – Места образования и схема возврата просыпей в цехе помола цемента и силосах

Большие объемы просыпей образуются на участке дозаторов сырья, под мельницей, под бункером цемента и в приемке пневмовинтовых насосов. На участке дозаторов и под мельницей в зоне загрузки – просыпи клинкера, шлака, гипса. В мельнице сырье перемалывается в цемент, который из-за негерметичности оборудования скапливается под мельницей, под бункером и в приемке насосов. Поэтому в цехе помола цемента целесообразно использовать систему всасывающего пневмотранспорта, разделяющую потоки сырья и готовой продукции.

Просыпи сырья с участка дозаторов и в зоне загрузки мельницы по трубопроводам поступают в питатели мельниц. Готовый продукт из зоны выгрузки мельницы и из приемки пневмовинтовых насосов подается в накопительную камеру фуллерных насосов. Такая схема всасывающего пневмотранспорта позволяет собирать просыпи во всем цехе и обеспечивает возврат их в

технологический процесс с минимальными потерями. Также она используется для зачистки мельницы при ее аварийной остановке [65].

Несмотря на отмеченные достоинства, вакуумная пылеуборка не нашла еще достаточного распространения на заводах строительных материалов [34, 43].

#### **1.4 Анализ существующих методов расчета систем всасывающего пневмотранспорта и аспирации**

##### **1.4.1 Скорости витания, трогания, транспортирования в системах пневмотранспорта**

Пневматический транспорт материалов по своей физической сущности необходимо рассматривать, как гидродинамическое взаимодействие тела и воздуха. Пневмотранспорт основан на способности воздуха при своем движении по трубопроводу перемещать материал во взвешенном состоянии. Его можно рассматривать, как частный случай двухфазного потока, где одна фаза – воздушный поток, другая – транспортируемые частицы твердого тела. Основы науки о гидродинамике двухфазных потоков разработаны в трудах М.В. Ломоносова, Л. Эйлера, Д. Бернулли, Н.Е. Жуковского, С.А. Чаплыгина и других ученых.

Первые наиболее систематизированные исследования процесса пневмотранспортирования зерновых материалов выполнены в 1921-1924 гг. И. Гастерштадтом. Последующие работы Е. Трефтца, М.П. Калинушкина, П.А. Козова, Л.С. Клячко, И.Н. Логачева, О.Д. Нейкова, А.И. Пирумова, А.Е. Смолдырева А.О. Спиваковского, К.И. Страховича и др. позволили подвести теоретическую базу под эту область техники, а также разработать методы расчета и проектирования установок пневматического транспортирования различных материалов. В дальнейшем эти вопросы развивались за счет накопления экспериментальных данных и уточнения установленных функциональных зависимостей.

Как отмечено в работе Сотникова А.Г. [106], задачей вентиляционной установки аспирации и пневмотранспорта является не только улавливание пыли, но и транспортирование уловленных частиц по воздуховодам. Перемещение частиц, взвешенных в потоке воздуха, производят пневматическим транспортом. Методы расчета установок, применяемые для этой цели, отличаются от методов расчета обычных вентиляционных систем [106]. Особенности методов расчета связаны с характеристиками перемещаемых материалов, основной из которых является размер частиц. Так, например, Минко В.А. [76] предложена следующая классификация аэрозолей в зависимости от аэродинамической характеристики одиночной частицы в полидисперсном материале:

- аэрозоли (размер твердых частиц менее 50 мкм);
- тонкодисперсные аэросмеси (от 50 до 150 мкм);
- грубоформовочные массы – до 1–2 кг/ (п.м · ч).

Системы пневмотранспорта применяются, как правило, для перемещения полидисперсных материалов с максимальным размером ( $a$ ) частиц, не превышающим 10 мм. Кузнецовым Ю.М. [51] отмечено, что в механике насыпных грузов принята следующая классификация:

- крупнозернистые ( $2 < a < 10$  мм);
- мелкозернистые ( $0,5 < a < 2,0$  мм);
- порошкообразные ( $0,05 < a << 0,5$  мм) и
- пылевидные ( $a < 0,05$  мм).

Методы расчета рассматриваемых систем также существенно зависят от концентрации смеси. С этой точки зрения все системы условно делят на системы с большой ( $\mu > 1$ ) и с малой ( $\mu < 1$ ) концентрацией [44]. Особенностью систем с малой концентрацией является свободное обтекание твердых частиц потоком воздуха, вследствие чего изменяются и характер взаимодействующих сил, и механизм транспортирования.

Аэродинамический расчет систем пневмотранспорта и аспирации начинают с определения количества транспортируемого материала согласно данным технологов. Далее выбирают количество транспортируемого воздуха, определяют скорости витания, трогания и транспортирования, затем переходят к расчету потерь давления в воздуховодах.

Потери давления в воздуховоде с учетом перемещаемого материала могут быть определены по формуле [97]:

$$\Delta p_v = 1,1\Delta p_c(1 + c\mu) + gh\mu' + p_d,$$

где  $\Delta p_c$  – потери давления в сети по чистому воздуху, Па;  $c$  – опытный коэффициент, зависящий от вида транспортируемого материала;  $\mu$  – массовая концентрация, кг/кг;  $h$  – высота подъема транспортируемого материала, м;  $\mu'$  – объемная концентрация смеси, кг/м<sup>3</sup>, равная отношению массового расхода транспортируемого материала  $G_m$ , кг/ч, к расходу воздуха  $Q_v$ , м<sup>3</sup>/ч.

Таким образом, основными параметрами для расчета систем пневмотранспорта и аспирации являются: скорости витания, трогания и транспортирования взвешенных частиц.

Одним из решающих условий, от которых зависит надежность и экономичность систем пневмотранспорта, является правильный выбор скорости транспортирующего воздушного потока. Завышение этой скорости сокращает срок службы элементов пневмопроводов (изнашивание), ведет к увеличению потерь давления в сети и расхода электроэнергии, а занижение ее может вызвать выпадение транспортируемого материала в пневмопроводе и его закупоривание [17, 42, 43–44, 61, 70, 87–88, 115].

Транспортирующей скоростью воздуха  $w_T$  называется минимальное значение скорости воздуха, при которой обеспечивается устойчивое движение частиц материала в трубопроводе. Во многих литературных источниках транспортирующую скорость воздуха, как на вертикальных, так и на горизонтальных участках сети рекомендуется определять, исходя из скорости витания частиц материала [12, 16, 27, 44, 48, 51, 57, 87, 108, 109, 115 и др.]. В других

работах скорость транспортирования на горизонтальных участках связывают со скоростью трогания [16,17, 78 87, 97].

Скоростью витания частиц материала  $w_{\text{вит}}$  принято называть скорость воздушного потока, при которой частицы материала заданной формы, веса и размера будут находиться в вертикальной трубе во взвешенном состоянии. В этом случае поступательное движение частиц отсутствует, частицы лишь колеблются в некоторых пределах равновесного положения.

Скорость витания является «важнейшей аэродинамической характеристикой транспортируемых частиц ... материалов» [17], а величина этой скорости – «одна из основных исходных данных расчета систем пневматического транспорта, и правильное определение этой величины чрезвычайно важно» [44]. Самым надежным методом определения скорости витания часто является экспериментальный. «Аналитический» метод определения скорости витания частиц  $w_{\text{вит}}$  (менее точный) базируется на экспериментальных данных, но не учитывает точную форму и шероховатость частиц» [17].

Скорость витания частиц определяется по формуле [38], м/с:

$$w_{\text{вит}} = 3,62 \sqrt{\frac{d \rho_{\text{ч}}}{c \rho_{\text{г}}}}. \quad (1.1)$$

Многие исследователи [11, 48, 57, 115] определили в своих экспериментах величину коэффициента сопротивления  $c$  и вывели аналитические зависимости для его нахождения, некоторые из которых представлены в таблице 1.4.

Сугак Е.В. [110] считает, что движение твердых частиц в турбулентном потоке газа отличается большей, чем в ламинарном, сложностью и интенсивностью межфазного взаимодействия. Это обусловлено, прежде всего, беспорядочными турбулентными пульсациями среды и связанными с ними колебательными движениями частиц, их турбулентной диффузией. Влияние концентрации частиц на сопротивление их движению из-за сложности процессов недостаточно изучено. Теоретические решения получены только для режима

Стокса, для диапазонов больших чисел Рейнольдса таких решений нет из-за трудностей математического описания взаимодействия частиц.

Таблица 1.4 – Расчетные формулы, предлагаемые для определения коэффициента сопротивления  $c$

№ п/п	Автор	Предлагаемая расчетная формула	Условия применения формулы	Источник литературы
1	Стокс	$c = \frac{24}{Re}$	$Re < 0,5$	[11]
2	Клячко Л.С.	$c = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}$	$3 < Re < 400$	[48]
3	Лобаев Б.Н.	$c = \frac{4,3}{(\lg Re)^2}$	$Re = 5 - 5 \cdot 10^5$	[57]
4	Успенский В.А.	$c = 0,54 + 0,447 \frac{d}{D}$	$\frac{d}{D} = 0,17 \div 0,86$ $Re = 2,5 \cdot 10^3 \div 1,3 \cdot 10^4$	[115]
5	Худяков Г.Н., Чуханов З.Ф.	$c = 1,4 Re^{-0,18}$	$Re = 10^2 \div 6 \cdot 10^2$	[44]
6	Кафаров В.В.	$c = \frac{18,5}{Re^{0,6}}$	$2 < Re \leq 500$	[47]
		$c = 0,43$	$500 < Re < 2 \cdot 10^5$	

Е.А. Жихарев [38] отмечает, что в условиях пневмотранспорта действительный коэффициент сопротивления частиц является «весьма сложной функцией нескольких переменных: числа  $Re_{\text{ч}}$  (отнесенного к частице), относительной крупности частиц  $\frac{d}{D}$ , степени турбулентности потока, которая характеризуется величиной критерия  $Re$ ».

$$c_{\text{действ}} = f(Re_{\text{ч}}; \frac{d}{D}; \frac{y}{R}; Re), \quad (1.2)$$

где  $y$  – расстояние от оси до точки приложения, м;  $Re$  – число Рейнольдса воздушного потока;  $Re_{\text{ч}}$  – число Рейнольдса частицы;  $R$  – радиус трубопровода, м.

Реальные частицы сыпучих материалов (цемент, гипс, песок, керамические порошки, древесные опилки) не имеют шарообразной формы.

Для тел неправильной формы некоторые исследователи [12, 51, 78] предложили определять скорость витания путем введения в основную формулу (1.1) диаметра эквивалентного шара  $d_{\text{экв}}$ , объем которого равен объему данной частицы.

С.Е. Бутаков [12] предложил определять этот диаметр из выражения:

$$d_{\text{экв}} = \frac{1,5V_{\text{ч}}c_{\text{ш}}}{S_{\text{ч}}c_{\text{ч}}}, \quad (1.3)$$

где  $V_{\text{ч}}$ ,  $S_{\text{ч}}$  – соответственно объем и площадь миделева сечения частицы;  $c_{\text{ш}}$ ,  $c_{\text{ч}}$  – соответственно коэффициент сопротивления шара и частицы;

Однако, в формулу входит коэффициент, который должен определяться опытным путем, вследствие чего использование этой формулы затруднительно [12].

А.А. Надеин [78], Кузнецов Ю.М. [51] предлагают использовать в расчетах:

$$d_{\text{экв}} = \sqrt[3]{6V_{\text{ч}}/\pi}, \quad (1.4)$$

где  $V_{\text{ч}}$  – объем частицы,  $\text{м}^3$ .

Влияние несферичности формы твердых частиц учитывается различными способами, чаще всего коэффициент сопротивления, рассчитанный для сферической частицы с эквивалентным диаметром, умножается на динамический коэффициент формы [24, 72, 115], который для частиц:

- шаровой формы равен 1,
- округленной частицы с неровной поверхностью – 2,4 (2,5),
- продолговатых частиц – 3,
- пластинчатых – 5,
- для смеси частиц неправильной формы – 2,9.

Авторы [34, 74, 115] исходят из того положения, что форма тела оказывает существенное влияние на величину коэффициента сопротивления  $s$  и

предлагают учитывать ее влияние коэффициентом формы  $K_{\phi}$  (или сферичности  $K_{\text{сф}}$ ), равным отношению коэффициентов сопротивления данного тела и эквивалентного шара:

$$K_{\phi} = S_{\text{ч}} / S_{\text{ш}}, \quad (1.5)$$

где  $S_{\text{ч}}$ ,  $S_{\text{ш}}$  – соответственно, площадь поверхности реальной частицы и шарообразной частицы, имеющий тот же объем.

Коэффициент сферичности является величиной обратной геометрическому коэффициенту формы:  $K_{\text{сф}} = \frac{1}{K_{\phi}} \leq 1$ .

В работах [34, 78] отмечается, что скорость витания частиц не шарообразной формы больше, чем у частиц, имеющих форму шара, вследствие уменьшения миделева сечения из-за наличия пространственного вращательного движения частицы. Значения геометрических коэффициентов формы для некоторых видов сыпучих материалов приведены в таблице 1.5.

В.М. Грушко [44] на основе обработки своего обширного экспериментального материала предложил следующую формулу для расчета скоростей витания кусковых материалов произвольной формы:

$$w_{\text{вит}} = K_{\text{вит}} \sqrt{\frac{G_{\text{м}}}{S_{\text{м}} \rho_{\Gamma}} \left( 1 - \frac{S_{\text{м}}}{0,785 D^2} \right)}, \quad (1.6)$$

где  $K_{\text{вит}}$  – критерий витания, учитывающий соотношение между массовыми и динамическими силами, действующими на частицу;  $G_{\text{м}}$  – максимальный вес кусков материала, подлежащих транспортированию, кг;  $S_{\text{м}}$  – площадь наименьшего миделево сечения самых крупных кусков  $\text{м}^2$ .

Различными исследователями [27,48, 51, 57, 87,108, 107, 115] получены аналитические зависимости для определения скорости витания частиц шарообразной и произвольной формы, некоторые из которых приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.5 – Геометрические коэффициенты для частиц различных материалов

Материал	Кажущаяся плотность частицы, кг/м <sup>3</sup>	Преобладающая форма частиц	$K_{\phi}$	$K_{сф}$
Вспученный перлит	2280	Округлые и продолговатые с ноздреватой поверхностью	1,3 – 1,5	0,77 – 0,66
Порошок из вспученного перлита	2350 – 1850	Тонкие пластинки	2,0 – 2,1	0,50 – 0,47
Вермикулит	2750	Тонкие пластинки	1,9 – 2,0	0,53 – 0,50
Вспученный вермикулит	1200 – 1000	Пластинки	1,4 – 1,5	0,71 – 0,66
Молотая слюда	2700	Пластинки	2,0 – 2,1	0,50 – 0,47
Тальк	2750	Таблетки	1,15 – 1,2	0,88 – 0,83
Графит	2000 – 2400	Плоские и угловатые	1,18 – 1,2	0,84 – 0,83
Кварцевый песок	2650	Угловатые	1,15 – 1,2	0,88 – 0,83

Из изложенного выше следует, что куски неправильной формы будут надежно уноситься потоком воздуха, если скорость его принята равной скорости витания, подсчитанной для эквивалентного шара. Форма частиц почти всех сыпучих строительных материалов имеет окатанную (округленную) форму, так как острые грани частиц истираются еще до поступления материала в пневмотранспортную установку, или при многократных погрузочно-разгрузочных операциях, или в процессе изготовления на заводе [61].

И.П. Малевич и В.А. Успенский [61, 62, 115] отмечают влияние влажности материала на величину витания и в целом на процесс пневматического транспортирования порошкообразных строительных материалов. Предел влагосодержания, при котором не нарушается пневмотранспорт, для разных материалов различен. Так, например, слипаемость мелочи каменных углей, типа кизеловского, наступает при влажности 9 % и выше; для порошкообразных строительных материалов (цемент, гипс) влажность не должна превышать 1 %

Таблица 1.6 – Расчетные формулы для определения скорости витания частиц шарообразной и произвольной формы

№ п/п	Автор	Предлагаемая расчетная формула для определения скорости витания	Условия применения формулы	Источник литературы
1.	Гринев К.М.	$w_{\text{ВИТ}} = 5,7 \sqrt{d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{Г}}}}$	Re=5000 c=0,39	[27]
2.	Страхович К.И.	$w_{\text{ВИТ}} = 5,0 \sqrt{d \rho_{\text{ч}}}$	–	[109]
3.	Клячко Л.С.	$w_{\text{ВИТ}} = 4,7 \sqrt{d \rho_{\text{ч}}}$	Re<1000	[48]
4.	Спиваковский А.О.	$w_{\text{ВИТ}} = \sqrt{28,4 d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{Г}}}}$	–	[108]
5.	Роганов Б.И. Калинушкин М.П.	$w_{\text{ВИТ}} = 3,62 \sqrt{d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{Г}}}}$	–	[44]
6.	Лобаев Е.Н.	$w_{\text{ВИТ}} = 1,745 \sqrt{d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{Г}}}} \lg \text{Re}$	Re=5÷5·10 <sup>5</sup>	[57]
7.	Полушкин В.И.	$w_{\text{ВИТ}} = \sqrt{\frac{4gd\rho_{\text{ч}}}{3c_D\rho_{\text{Г}}}}$	10<Re<10 <sup>4</sup> c <sub>D</sub> =0,47   Re >10 <sup>4</sup> c <sub>D</sub> =0,2	[87]
8.	Успенский В.А. Кузнецов Ю.М.	$w_{\text{ВИТ}} = \sqrt{\frac{4gd(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{Г}})}{3c_D\rho_{\text{Г}}}}$	800 < Re < 2·10 <sup>5</sup> c <sub>D</sub> =0,48	[115] [51]
9.	Жихарев Е.А.	$w_{\text{ВИТ}} = 3,62 \sqrt{\frac{d \rho_{\text{ч}}}{c \rho_{\text{Г}}}}$	–	[38]

по массе, так как при увеличении влажности эти материалы могут слеживаться.

Таким образом, величина скорости витания зависит от многих различных факторов: вида, размера, формы и состояния поверхности частиц материала, его объемного веса, влажности и характеристики воздушного потока (степень турбулентности, закрученности, засорения и пр.).

Если о скорости витания можно говорить применительно к вертикальным каналам с восходящим потоком, то «при расчетах горизонтальных и

наклонных каналов следовало бы исходить из скорости трогания, имеющую «решающее значение при выборе скорости транспортирования» [44].

Ряд исследователей полагают, что скорость витания одиночной частицы не учитывает всего разнообразия явлений, происходящих при движении частиц по трубопроводу, и в расчетах движения частицы как в вертикальном, так и в горизонтальном трубопроводе следует исходить так же и из скорости трогания частицы [44].

Скоростью трогания частиц материала  $w_{тр}$  называют минимальную скорость воздушного потока (осредненную по поперечному сечению трубопровода), при которой тело, лежащее в горизонтальной трубе, под влиянием увеличивающегося лобового давления воздуха трогается с места и начинает поступательно перемещаться по дну трубопровода скольжением или иногда перекатыванием по дну трубы [44].

Зависимости для скорости трогания приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Расчетные зависимости для скорости трогания

№ п/п	Автор	Полученная зависимость	Примечание	Лит-ра
1.	Воскресенский В.Е.	$w_{тр} = \sqrt{\frac{2G}{\rho F_{ч} c_{ч}}}$	для одиночных частиц	[17]
2.	Полушкин В.И.	$w_{тр} = w_{вит} \left[ 1 + (K_{п} + \bar{a}^2 \pi / 4) \right] \bar{\rho}_{ч} \bar{d}_{ч}$		[87]
3.	Надеин А.А.	$w_{тр} = \sqrt{2/3 f_{тр} dg(\rho_{ч} - \rho) / (\rho(c/2 - f_{тр}))}$	при $Re=200 \div 400$	[78]
4.	Годес О.М.	$Re_{тр} = Ar f_{тр} / (18 + 0,61 \sqrt{Ar f_{тр}})$	где $Re_{тр} = \frac{\rho_{г} d_{экв} w_{тр}}{\mu}$	[78]
5.	Воронин Ю.Б.	$w_{тр} = \sqrt{\frac{2G}{\rho S_{ч} c_{ч}} + N \mu^n}$	для частиц с учетом геом. размеров, коэф-фиц. сопротив. и концентрации	[16]
6.	Торговников Б.М.	$w_{тр} = 1,33 \sqrt{\rho_{ч}}$	при $\mu \geq 0,01$	[97]

Скорость витания и скорость трогания не определяют ту скорость, с которой должны перемещаться твердые тела в системе пневматического транспорта. Для этого используют скорость транспортирования  $w_T$ . Под этой скоростью понимают скорость воздушного потока, при которой материал перемещается в трубопроводе во взвешенном состоянии, без осаждения на поверхность воздуховода [51]. Поэтому скорость транспортирования принимается значительно больше скоростей витания и трогания [42,51]. Обычно, пишет А.П. Казаков, рабочая скорость воздуха принимается в 1,25–2,8 раза больше скорости витания [42]. Многие опыты показывают, считает И.П. Малевич [61], что скорость транспортирующего воздуха значительно (в 2–3 раза) превышает скорость витания.

Многие исследователи дают значения скорости транспортирования, исходя из скорости витания, в виде, м/с:

$$w_T = aw_{\text{вит}}, \quad (1.7)$$

где  $a$  – коэффициент запаса.

Данные ряда авторов по взаимосвязи этих скоростей сведены в таблице 1.8.

Как видно из таблицы 1.8, скорость транспортирования как в горизонтальных трубопроводах, так и в вертикальных превышает скорость витания самых крупных частиц из числа транспортируемых, однако «рекомендации авторов по выбору величины этого отношения весьма разноречивы» [44].

С.Н. Святковым [100] получена формула для определения оптимального значения транспортирующей скорости воздуха, м/с:

$$w_T = 1,1 \left( 4\mu \frac{w}{w_M} + 0,01\rho_M + b \right), \quad (1.8)$$

где  $\rho_M$  – плотность древесины транспортируемых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\frac{w}{w_M}$  – коэффициент опережения скорости воздушного потока по отношению к скорости ма-

ции

териала;  $b$  – коэффициент формы и размеров частиц (принимается по таблице 1.9).

Таблица 1.8–Зависимость скорости транспортирования от скорости витания для различных материалов

№ п/п	Автор	Материал	Рекомендуемое значение коэфф. $a$	Примечание	Источник литературы
1.	Казаков А.П.	Зерно	1,25 – 1,3 1,5 2,5 – 2,8	при $\mu < 1,0$ $\mu < 2,0$ $\mu = 10 \div 15$	[42]
2.	Калинушкин М.П. Орловский З.Э.	Строительные материалы	1,1 – 1,2	для вертикальных и горизонтальных участков с подстилающим слоем	[44]
3.	Калинушкин М.П. Орловский З.Э.	Строительные материалы	1,3 – 1,4	для горизонтальных участков без подстилающего слоя	[44]
4.	Солопов С.Г. Горцакалян Л.О.	Гранулированный торф	2,0	$w_{\text{вит}} = 4 - 8 \text{ м/с}$	[102]
5.	Жихарев Е.А.	Зернистые материалы	2,0	$Re = 3 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^5$	[38]

Таблица 1.9–Коэффициенты для определения транспортирующей скорости

Транспортируемый материал	Параметр $b$	Параметр $w/w_M$
Опилки:		
мелкие	7	1,11
крупные	8	1,18
Стружка:		
мелкая	9	1,18
крупная	10	1,25
Сортировочная технологическая щепка (длина частиц до 35 мм)	11	1,43
Крупная несортированная щепка, (длина частиц более 40 мм)	13	1,67

Для определения оптимальной скорости транспортирования щепы, коры, древесных отходов по трубам диаметром  $D = 377\text{--}630$  мм с концентрацией смеси  $\mu = 0,5\text{--}5$  кг/кг Ю.Б. Ворониным получена другая зависимость, м/с [16]:

$$w_T = \sqrt{500 + N\mu^{0,6}d^{0,5}}, \quad (1.9)$$

где  $\sqrt{500} = 22,3$  м/с – средняя скорость воздуха, обеспечивающая устойчивое транспортирование во взвешенном состоянии одиночных частиц различных видов измельченных древесных материалов; скорость воздуха получена для диаметра трубопровода  $D = 377$  мм; с увеличением количества частиц (концентрации смеси  $\mu$ ) и диаметра трубопровода  $d$  скорость воздуха должна увеличиваться;  $N$  – опытный коэффициент, зависящий от вида материала: для технологической щепы  $N = 525$ , измельченной коры  $N = 665$ , древесные отходы (опилки)  $N = 570$ .

В. И. Полушкиным для расчета скорости транспортирования получена формула, приведенная в работе [87], м/с:

$$w_T = w_B \left( 1,5 + \frac{K + \frac{\bar{a}^2}{4}}{\bar{\rho}_q \bar{d}} \right)^2, \quad (1.10)$$

где  $\bar{d} = d/D$  – относительный диаметр частицы;  $\bar{\rho}_q = \rho_q/\rho$  – относительная плотность частицы;  $\bar{a} = a/D$ ,  $a$  – абсолютная шероховатость поверхности;  $D$  – диаметр трубопровода, мм.

С учетом влияния массовой концентрации скорость транспортирования [87], м/с:

$$w_{T.M} = w_T(1 + \mu). \quad (1.11)$$

Расчет скорости проводился для прямолинейных участков сети. В фазонных участках системы происходит изменение направления потока (его поджатие, закручивание и т.д.) в этих участках может происходить оседание

твердых частиц. Поэтому скорость транспортирования принимается на 20–30 % больше. Кроме того, отмечает В.И. Полушкин [87], при определении этой скорости необходимо учитывать влажность материала и если материал повышенной влажности, то скорость также необходимо увеличить.

В работе [48] для определения скорости транспортирования на горизонтальном участке автор предлагает исходить из скорости трогания, м/с:

$$w_T = bw_{\text{тр}}, \quad (1.12)$$

где  $b$  – постоянный коэффициент.

В работах [42, 44, 62] предложена формула, представляющая практический интерес и позволяющая выбирать расчетную скорость транспортирования без предварительного определения скорости трогания, м/с:

$$w_T = a\sqrt{\rho_M} + BL_{\text{пр}}^2, \quad (1.13)$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий крупность частиц сыпучего материала, принимается из таблице 1.10;  $\rho_M$  – плотность материала, т/м<sup>3</sup>;  $B$  – коэффициент, зависящий от характера транспортируемого материала  $B = (2-5) \cdot 10^{-5}$ , при этом меньшие значения следует принимать для сухих пылевидных материалов, а для комкующихся, абразивных, тяжелых – большие значения;  $L_{\text{пр}}^2$  – приведенная длина транспортирования с учетом замены сопротивлений в коленах, разгрузителях и т.п., эквивалентной длиной прямолинейного трубопровода.

Таблица 1.10 – Значения коэффициента  $a$

№ п/п	Род материала	Крупность частиц, мм	$a$
1.	Пылевидный	0-1	10-16
2.	Зернистый однородный	1-10	16-20
3	Мелкокусковой	10-20	20-22
4.	Среднекусковой	40-80	22-25

Формула 1.13 рекомендуется для частиц размером до 80 мм.

Кроме того, формула 1.13 предлагается для установок, имеющих сложную трассу, с несколькими вертикальными и горизонтальными участками.

В.А. Успенский [115] предлагает достаточно простое и удобное уравнение для определения скорости частиц, выражающее зависимость ее от объемной концентрации и расхода материала:

$$w_T = \frac{G_M}{\mu' S_0}, \quad (1.14)$$

где  $G_M$  – расход материала, кг/сек;  $S_0$  – площадь сечения трубы, м<sup>2</sup>.

Практика работы пневмотранспортных установок показывает, что отставание скорости движения древесных частиц от воздуха в вертикальных трубопроводах с восходящим воздушным потоком несколько больше, чем в горизонтальных.

Поэтому выбор необходимой скорости транспортирования зависит в каждом конкретном случае от характера трассы и транспортируемого материала. При наличии вертикальных участков рекомендуется значение  $w_T$  выбирать по этим участкам.

В.Е. Воскресенский [17] считает целесообразным уменьшить диаметр вертикальных труб, тем самым, увеличив скорость воздуха в них по формуле, м:

$$D_{\text{верт}} = D_{\text{гор}} \sqrt{\frac{w_T}{w_T + w_{\text{вит}}}}. \quad (1.15)$$

Скорость в вертикальном воздуховоде Б.М. Торговников [97] предложил определять по формуле, м/с:

$$w_{\text{верт}} = w_T + w_{\text{вит}}. \quad (1.16)$$

Таким образом, из анализа рассмотренных работ видно, что нет теоретически обоснованных зависимостей между величинами скоростей транспортирования, трогания, витания. Для выбора расчетной величины транспортной скорости «современная теория пневматического транспорта не дает надежных обобщающих формул» [44].

Величина этой скорости во всех исследованиях установлена для каждого вида материала экспериментально.

Вопрос о скорости движения частиц твердой фазы при движении двухфазного потока в вертикальном и горизонтальном участках трубопровода решался исследователями по-разному. Несмотря на тщательно проведенные экспериментальные исследования М.П. Калинушкина, Ю.Б. Воронина, В.Е. Воскресенского, В.И. Полушкина, А.А. Надеина, Ю.М. Кузнецова и др. до настоящего времени нет единого выражения для определения величины действительной скорости движения частиц перемещаемого материала. Большинство авторов [12, 17, 24, 34, 44 и др.] считают, что при вертикальном транспортировании между скоростями несущего воздушного потока  $w$ , витания  $w_{\text{вит}}$  и действительной скоростью перемещения материала  $w_{\text{м}}$  существует вполне определенная зависимость:

$$w_{\text{м}} = w - w_{\text{вит}}. \quad (1.17)$$

В горизонтальном трубопроводе условия движения двухфазного потока иные, чем в вертикальном, и поэтому имеют место другие соотношения между скоростями воздуха и материала. В этом случае частицы материала перемещаются со скоростями несколько меньшими, чем скорость воздуха. При увеличении скорости воздуха абсолютная скорость движения материала также возрастает.

Однако относительная скорость движения материала или коэффициент отставания скорости материала  $w_{\text{м}}$  от скорости воздуха  $n = \frac{w_{\text{м}}}{w}$  возрастает до определенного предела, после чего остается постоянной для данных частиц материала, как бы ни увеличивалась скорость воздуха [14, 95].

Некоторые исследователи [10, 13, 37, 93, 106] выражают скорость материала через скорость воздуха и коэффициент скольжения, найденный экспериментально:

$$w_{\text{м}} = cw. \quad (1.18)$$

Таким образом, данные литературных источников по выявлению взаимосвязи между скоростями движения материала и воздуха при различных режимах пневмотранспорта дают неоднозначные результаты.

#### 1.4.2 Концентрация аэросмеси

Для количественной характеристики работы установок пневматического транспорта пользуются понятием – концентрация смеси.

Концентрация смеси сыпучего материала с воздухом и скорость транспортирования в значительной мере влияют на надежность и экономичность работы пневмотранспортной установки [100].

Различают массовую  $\mu$  и объемную  $\mu'$  концентрацию, понимая под этим отношение весов или объемов транспортируемого материала ( $G_M$  и  $Q_M$ ) и транспортирующего воздуха ( $G_B$  и  $Q_B$ ) за единицу времени: то есть:

$$\mu = \frac{G_M}{G_B}; \mu' = \frac{Q_M}{Q_B}. \quad (1.19)$$

Объемную концентрацию можно выразить через массовую:

$$\mu' = \mu \frac{\rho_B}{\rho_M}. \quad (1.20)$$

Величина концентрации смеси воздуха и материала является так же, как и скорость воздуха, важной характеристикой пневмотранспортных установок, влияющей на величину потерь давления в сети. Поэтому принимаемое значение концентрации должно быть обоснованным. За оптимальное значение концентрации смеси  $\mu_{\text{опт}}$ . «следует принимать такое значение, при котором пневмотранспортная система заданной производительности имеет наименьшие приведенные затраты, включающие эксплуатационные расходы, обусловленные энергозатратами» [17 стр. 48].

При движении в воздушном потоке не отдельных частиц, а реальных материалов с увеличением концентрации смеси  $\mu$  происходят снижение скорости частиц материала  $w_{\text{ч}}$  и их выпадение из воздушного потока на дно трубы [17].

А.А. Надеин [78] так же считает, что при высокой концентрации частиц твердой фазы расстояния между отдельными частицами малы и часть их может попасть в гидродинамический след частиц, движущихся впереди. Лобовое сопротивление при этом снижается, и при недостаточной скорости газа частицы будут выпадать из потока, что является одной из основных причин возникновения завала.

В работе [17] исследуются зависимости концентрации смеси  $\mu$  от производительности установки транспортирующей скорости, длины трубопровода и его диаметра.

Если на каком-либо участке трубопровода определять концентрацию смеси путем отсечки материала с помощью двух синхронно закрывающихся заслонок, то в этом случае можно определить величину действительной концентрации смеси  $\mu_d$ , то есть отношение веса материала к весу воздуха, находящихся в данном объеме трубы. Если масса отсеченного материала  $M_m$ , длина участка  $l$  (между заслонками), а площадь сечения трубы  $S$ , то:

$$\mu_d = \frac{M_m}{lS\rho_B}. \quad (1.21)$$

Действительная концентрация смеси всегда больше весовой концентрации и может быть выражена так:

$$\mu_d = \mu \frac{w}{w_{\text{ч}}}. \quad (1.22)$$

Некоторые авторы считают, что целесообразно потери давления при движении смеси определять с учетом действительной концентрации, «наиболее реально отражающей картину движения смеси» [100].

Таким образом, выбор величины оптимальной концентрации должен приниматься в каждом конкретном случае.

Как видно из приведенного выражения для определения действительной концентрации смеси (1.22), еще раз указывается на необходимость изучения относительной скорости движения материала  $C = \frac{w_{\text{ч}}}{w}$ .

Что тем более необходимо, если встать на позиции некоторых авторов, считающих, что потеря давления в трубопроводе зависит от величины этой концентрации аэросмеси.

### **1.4.3 Характер движения частиц материала в вертикальных и горизонтальных воздуховодах**

#### *Физические модели двухфазного потока*

Характер движения частиц перемещаемого материала определяет аэродинамические потери давления на транспортирование и тем самым расход электроэнергии на работу пневмотранспортной установки. Поэтому правильное понимание механизма движения частиц в трубопроводах имеет существенное практическое значение.

Характер движения частиц зависит от их формы, размеров и веса, скорости потока, концентрации аэросмеси и ряда других факторов, «трудно поддающихся аналитическому расчету» [44]. Наиболее трудным является теоретическое обоснование характера движения частиц транспортируемого материала на горизонтальном участке трубопровода. Следует отметить, что общепринятой теории движения материала в горизонтальных воздуховодах еще не создано, поэтому рассмотрим взгляды некоторых исследователей по этому вопросу.

Первоначально И. Гастерштадтом [20] и Е. Трефтцем [21] была предложена теория прямолинейного движения твердых частиц в горизонтальном воздушном потоке под действием одной силы потока без учета силы тяжести и других факторов, осложняющих движение частиц.

Эти положения были опровергнуты экспериментами М.П. Калинушкина, доказавшего, что при пневмотранспортировании пыли в горизонтальной трубе концентрация меняется по вертикальному диаметру трубы. В работе [44] М.П. Калинушкин отмечает, что при пневматическом транспортировании наблюдается непрерывный износ поверхности стенок трубы, что было бы невозможно при непрерывном взвешивании материала в горизонтальном потоке без выпадения его на нижнюю часть поверхности трубы. С другой стороны, имеющее место отставание материала от скорости несущего воздушного потока также опровергает положение И. Гастерштадта об отсутствии соприкосновения движущегося материала со стенками трубы. Ю.Б. Воронин [16], проведя исследования на щепе, помеченной радиоактивными изотопами с применением скоростной киносъемки, пришел к выводу о том, что движущийся по горизонтальным участкам трубопровода поток частиц самопроизвольно делится на три типа, перемещаемых в различных зонах по высоте продольного сечения трубопровода с различной концентрацией. На некотором расстоянии от начала трубопровода происходит сортирование – распределение зерен под влиянием сил гравитации, при этом в нижней части сечения трубы концентрируются более тяжелые, а в верхней – более легкие частицы.

Учет совместного действия потока и силы веса частиц транспортируемого материала привел к созданию теории скачкообразного движения частиц в горизонтальном потоке, выдвинутой Г.Л. Страховичем [109]. Автор объясняет подъем частицы материала со дна горизонтального трубопровода наличием градиента скорости вблизи стенки трубопровода. Вследствие срыва вихрей со стенок трубы и поверхности твердой частицы над ней образуется разреженное пространство, что также приводит к возникновению подъемной силы.

При движении частицы перпендикулярно оси потока вихревой хвост будет отклоняться в обратную сторону от движения тела, что обеспечивает возникновение подъемной силы, направленной перпендикулярно главному направлению движения потока.

Гипотезу скачкообразного движения поддержал Б.Ф. Турицын [21], сделавший попытку теоретического обоснования причин подъема отдельных частиц со дна трубопровода на основании теоремы Н.Е. Жуковского. Данная теорема в применении к пневматическому транспорту истолковывается следующим образом: для того, чтобы тело, перемещаемое потоком воздуха в горизонтальном трубопроводе, находилось во взвешенном состоянии, необходимо, чтобы оно имело вращательное движение.

Картина подъема и движения твердой частицы в горизонтальном трубопроводе имеет следующий вид: под влиянием силы действия потока частица начинает перемещаться по дну трубопровода, а так как коэффициент трения качения меньше, чем скольжения, частица начинает катиться. При достижении определенной угловой скорости, обеспечивающей возникновение подъемной силы, равной весу частицы, последняя поднимается со дна трубопровода. Отделившись от стенки, частица уменьшает скорость вращения, а, следовательно, исчезает подъемная сила, в результате чего под влиянием силы веса частица падает на дно трубопровода и цикл повторяется снова.

В.А. Шваб [21] считает, что устойчивый режим движения крупнозернистого материала в горизонтальном трубопроводе возможен только при скорости несущего потока, достаточной для возникновения скачкообразного движения вследствие ударного взаимодействия с нижней и верхней поверхностями трубопровода.

А.И. Голобурдин [21] пишет, что из-за неравномерного распределения скоростей потока по сечению канала обтекание даже шарообразных частиц является несимметричным. В результате такого воздействия потока, а также из-за соударений и ударов о стенку частицы начинают вращаться. Это приводит

к возникновению еще одной силы, которая в горизонтальном потоке вызывает подъем частиц со дна, а в вертикальном смещает частицы в горизонтальном направлении по отношению к оси канала, т.е. в сторону больших скоростей потока (эффект Мангуса).

М.П. Калинушкин [44] на основании проделанных экспериментов выдвинул теорию винтообразного движения частиц материала, согласно которой причиной взвешиваемости частиц является закрученность горизонтального воздушного потока. При этом движении сила тяжести частиц уравновешивается центробежной силой, возникающей при вращении потока. Опыты автора показали, что после таких местных сопротивлений, как отвод, тройник и другие фасонные части трубопроводов, воздушный поток начинает устойчиво винтообразно вращаться, при этом траектория движения частицы представляет собой винтообразную линию в случае, когда «центробежная сила больше силы тяжести и достаточна для прижатия твердой частицы к стенкам трубопровода». В случае если эта сила мала по сравнению с весом частиц, движение будет характеризоваться «перемещением частиц по дну трубопровода, либо движением их по пологим траекториям». Для выявления режима движения твердых частиц в трубопроводах М.П. Калинушкин [44] рекомендует пользоваться понятием критерия прижатия:

$$K_{\Pi} = \frac{(w_{\tau} \sin E_{\tau})^2}{gR \cos \beta}, \quad (1.23)$$

где  $E_{\tau}$  – угол скоса движения твердой частицы;  $R$  – радиус поперечного сечения трубы, м;  $\beta$  – угол наклона трубопровода к горизонту.

При  $K_{\Pi} > 1$  наблюдается винтообразное движение, при  $K_{\Pi} < 1$  – плоское движение.

Наличие вращательного движения частиц, транспортируемых по горизонтальным и вертикальным трубопроводам, было отмечено в работах многих исследователей [21, 44, 109]

В настоящее время, пишет Ю.Н. Микольский [70], можно считать установленным, что процессы переноса частиц материалов потоками газа обуславливаются кинематической структурой турбулентного потока (для большинства установок пневматического транспорта число Рейнольдса  $Re=2 \cdot 10^5$ ). В частности, взвешивание частиц материала в горизонтальном потоке объясняется, в основном, наличием поперечных составляющих пульсационных скоростей потока.

Таким образом, взвешивание твердых частиц в горизонтальном потоке обусловлено целым рядом факторов, присущих турбулентному течению (изменение скорости по поперечному сечению трубы и ее пульсация в потоке, срыв вихрей с нижней стенки трубы и поверхности частиц материала и пр.), а также характеристикой транспортируемого материала (размером, формой, состоянием поверхности частиц и пр.). Следует отметить, что характер движения влияет на потерю давления, а выявление действительного распределения частиц по сечению потока имеет существенное значение для установления минимальной транспортной скорости воздуха.

#### **1.4.4 Характер движения частиц материала в наклонных воздуховодах**

Расчету вертикальных и горизонтальных воздуховодов уделено достаточно большое внимание в отличие от наклонных. Так, например, Воскресенский В.Е. [17] считает, что наклонные участки трубопроводов с углом наклона к горизонту более  $60^\circ$  следует рассматривать как вертикальные, с углом до  $60^\circ$  – как горизонтальные.

Малевич И.П. [61] предлагает использовать при расчетах наклонных воздуховодов так же, как и горизонтальных скорость трогания, при которой одиночная частица под влиянием лобового давления воздуха сдвигается с места.

Как отмечается в работе [103], влияние угла наклона труб на аэродинамические характеристики двухфазного потока воздуха с твердыми

примесями изучено недостаточно. На рисунке 1.5 [98] приведены некоторые экспериментальные данные о влиянии наклона труб на условия пневмотранспорта зерен.

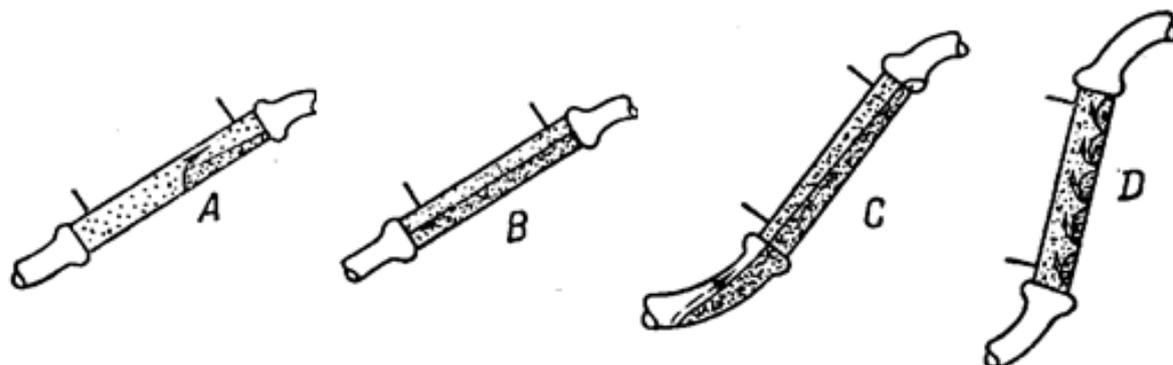


Рисунок 1.5 – Характер осаждения твердых частиц при различных наклонах трубопровода и скоростях потока

Отмечается, что при перемещении материала по наклонным трубам уменьшаются потери напора по сравнению с резким поворотом потока при переходе от горизонтальной к вертикальной трубе. Однако требуются достаточно высокие скорости во избежание возможного возникновения поршневого режима и сопутствующих вибраций трубопровода. Характер движения твердых частиц, как видно из рисунка 1.6, отличается разнообразием. Стрелками показано направление движения частиц. Схема *A* соответствует углу наклона  $22,5^\circ$  и скорости движения воздуха  $5,2 - 5,5$  м/с. В этом случае частицы оседают только в верхней половине трубы из-за нижнего отвода. В схеме *B* наклон сохранен, но скорость снижена до  $3,0 - 4,6$  м/с, основная масса частиц не перемещается. Перемещается только незначительная масса над осажденными частицами в виде диспергированной взвеси. В схеме *C* угол наклона составляет  $45^\circ$ , скорость сохраняется как в предыдущем случае. Осажденная масса начинает сползать по трубе, часть подхватывается и перемещается потоком воздуха. В схеме *D* наклон трубы составляет  $67,5^\circ$ , скорость воздуха –  $5,2$  м/с. В таких условиях образуются отдельные узлы осевших частиц, при понижении скорости, как указано в исследовании, возможно образование поршневого режима.

В литературе известны [132] схемы движения частиц в вертикальном и горизонтальном трубопроводах (рисунок 1.6).

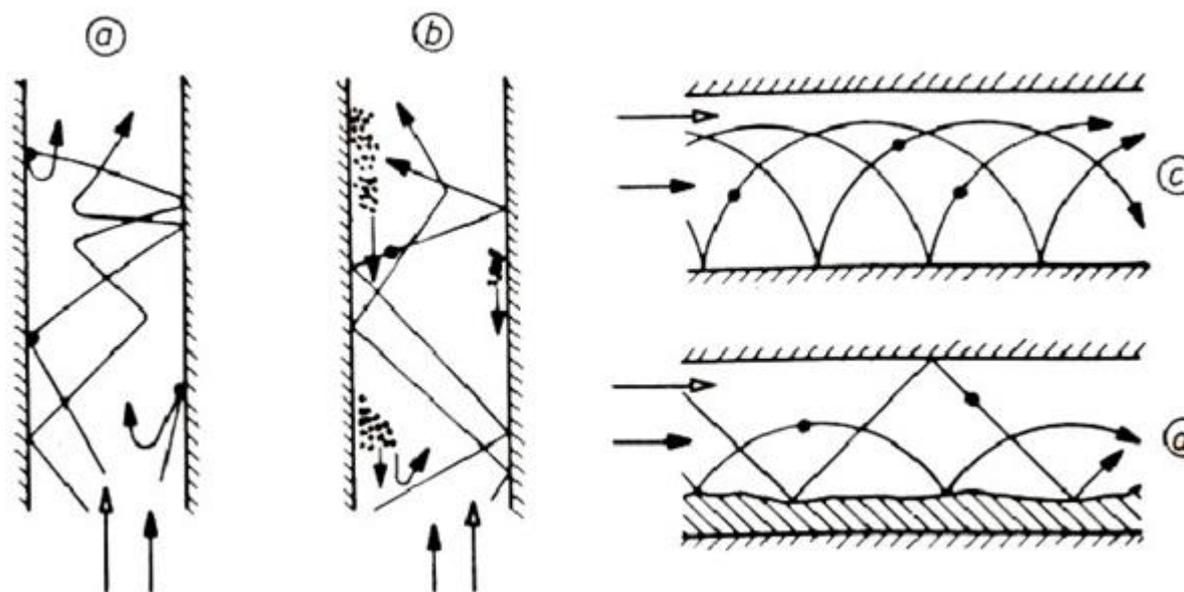


Рисунок 1.6 – Схемы движения частиц в вертикальном (*a, b*) и горизонтальном (*c, d*) трубопроводах

Причиной подобного движения твердых частиц являются поперечные силы, возникающие вследствие различных векторов скоростей, и сила тяжести. Под действием этих сил частицы сталкиваются со стенками труб, замедляются, отскакивают, скатываются по стенке и т.д. Для дальнейшего транспортирования необходимо увеличить скорость потока, что неизбежно повлечет дополнительные потери давления в трубе. Считается, что более или менее равномерный поток воздуха возможен при соответствующей скорости воздуха в вертикальном трубопроводе (рисунок 1.6 *a*). Но даже в этом случае возможно отделение частиц и движение их вниз (рисунок 1.6 *b*). В случае горизонтального трубопровода (рисунок 1.6 *c, d*) осаждение частиц на дно трубы в большей степени происходит из-за силы тяжести. При любой ориентации трубопровода потери давления связаны и с процессом обтекания потоком твердых частиц, которые движутся с меньшей скоростью, что наглядно видно на рисунке 1.7.

Очевидно, что в наклонных трубопроводах также влияют поперечные силы, обусловленные векторами скоростей, и сила тяжести. С увеличением угла наклона трубопровода возрастают центробежные силы.

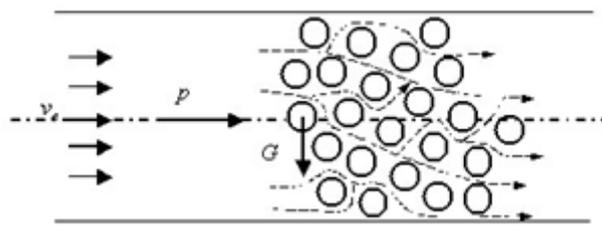


Рисунок 1.7 – Движение твердых частиц в горизонтальной трубе

Таким образом, анализ известных исследований аэродинамики в наклонных воздуховодах систем аспирации и пневмотранспорта определяет актуальность изучения этих процессов.

### 1.5 Выводы по главе 1

Из анализа работ, рассмотренных в литературном обзоре, можно сделать следующие выводы:

1. Анализ работ в области аспирации и пневмотранспорта предприятий, технологический процесс которых связан с перемещением сыпучих материалов, в том числе предприятий по производству сухих строительных смесей и цемента, показывает, что из-за отсутствия технической возможности полной герметизации пылящего оборудования и недостаточно эффективной работы местной вентиляции производственная среда характеризуется интенсивным пылевыделением в воздух рабочей зоны и образованием просыпей.

2. Наиболее эффективным способом сбора пыли и просыпей является вакуумный, который в настоящее время не нашел широкого распространения на заводах строительных материалов вследствие недостаточности данных, необходимых для расчета подобных систем.

3. Основными методами исследования систем аспирации и пневмотранспорта являются натурный и лабораторный физический эксперименты, в ре-

зультате которых различными авторами получены экспериментальные данные, демонстрирующие влияние геометрических и физических характеристик материалов на характер движения частиц пыли в потоке воздуха.

4. В результате вышеуказанных исследований получены эмпирические зависимости для нахождения скоростей витания, трогания и транспортирования для частиц различного происхождения с размерами определенных диапазонов, при этом в ряде случаев при анализе влияния отдельных факторов на величину необходимой скорости транспортирования и аэродинамического сопротивления авторы приходят к противоречивым выводам.

5. До настоящего времени отсутствует единый подход к определению связей или зависимостей, пригодных для прогнозирования характеристик необходимых для расчета систем аспирации и пневмотранспорта, предназначенных для транспортирования самых разнообразных материалов, без проведения трудоемких физических экспериментов.

## ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ ВИТАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

В работе Кузнецова Ю.М. [51] отмечено, что системы аспирации и пневмотранспорта с точки зрения пространственной ориентации включают следующие элементы:

- участок разгона, на котором транспортируемый материал после ввода его в поток газа получает некоторую конечную скорость;
- горизонтальный участок, где твердые частицы транспортируются в потоке воздуха;
- фасонные элементы;
- вертикальный участок, на котором происходит торможение частиц при движении пылевоздушного потока вертикально вверх и ускорение в случае их движения вертикально вниз;
- наклонный участок, течение потока в котором характеризуется некоторым состоянием между горизонтальным и вертикальным направлением.

Точная оценка потерь давления в таких системах крайне затруднительна, хотя имеются публикации, посвященные рассматриваемому вопросу [51]. Поэтому в ряде источников указывается, что большой удачей является расчет, при котором достигается погрешность  $\pm 30\%$ .

Как отмечено в главе 1, основополагающей характеристикой рассматриваемых систем является скорость витания твердых частиц.

### 2.1 Экспериментальная установка для определения скорости витания твердых частиц

Проблеме определения скорости витания одиночной твердой частицы посвящены экспериментальные и теоретические работы многих исследователей [12, 16, 27, 44, 48, 51, 57, 87, 108, 109, 115 и др.]. Для определения скорости

витания твердых частиц использовались экспериментальные установки, имеющие общие конструктивные особенности, например, такие как вертикальные воздуховоды [17, 53, 58].

В.Е. Воскресенский [17] считает экспериментальный метод определения скорости витания самым точным, и предложенная им установка состоит (рисунок 2.1): из радиального вентилятора 1, пирамидального диффузора 2, нагнетательного вертикального воздуховода 3, поворотной заслонки 4 типа «жалюзи» для регулирования расхода воздуха, прозрачной части вертикального воздуховода 5, нижней и верхней сеток 6, 7, загрузочного люка 8, приемника (пневмометрической трубки типа Прандтля) 9, дифференциального микроманометра 10.

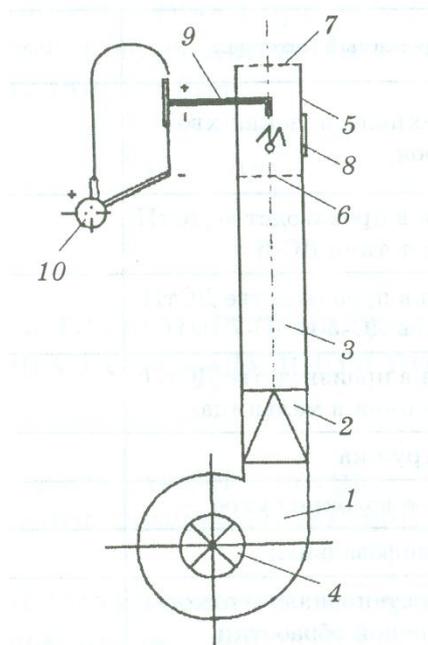


Рисунок 2.1 – Схема установки для определения скорости витания частиц материала [17]

Особенностью данной установки является то, что исследования скорости витания выполняются в нагнетательном вертикальном воздуховоде. На данной установке были получены скорости витания для измельченной коры (фракции от 1 до 40 мм) ели и осины, а также щепы ромбовидной формы хвойных пород (фракции от 1 до 40 мм) и пластинчатой формы осинового дерева (фракции от 2,5 до 40 мм).

Экспериментальная установка, представленная на рисунке 2.2. предложена для проведения учебного процесса [53].

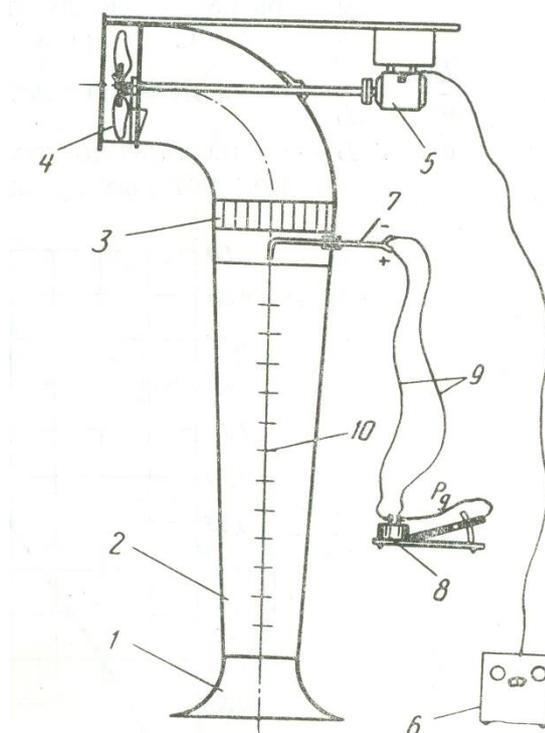


Рисунок 2.2 – Схема стенда для определения скорости витания [53]

Установка состоит из: прозрачной трубы витания 2, с углом конусности  $3^\circ$ . На входе установлен коллектор 1, внутренний профиль которого очерчен по лемнискате, на выходе из трубы имеется спрямляющая решетка 3. Движение воздуха обеспечивается осевым вентилятором 4 с электродвигателем постоянного тока 5. В цепь питания электродвигателя включен реостат 6. Для измерений давления используются пневмометрическая трубка 7 и микроманометр 8.

И.Н. Логачев и К.И. Логачев [58] предлагают определять аэродинамическую характеристику частиц измерением скорости витания на экспериментальной установке (рисунок 2.3).

Основная часть установки – коническая труба (конусностью  $5^\circ$ ), выполненная из органического стекла. Воздух в трубу поступает через коллектор, входная часть которого была выполнена по лемнискате, и через систему воздухопроводов и компенсационную камеру направляется к вентилятору.

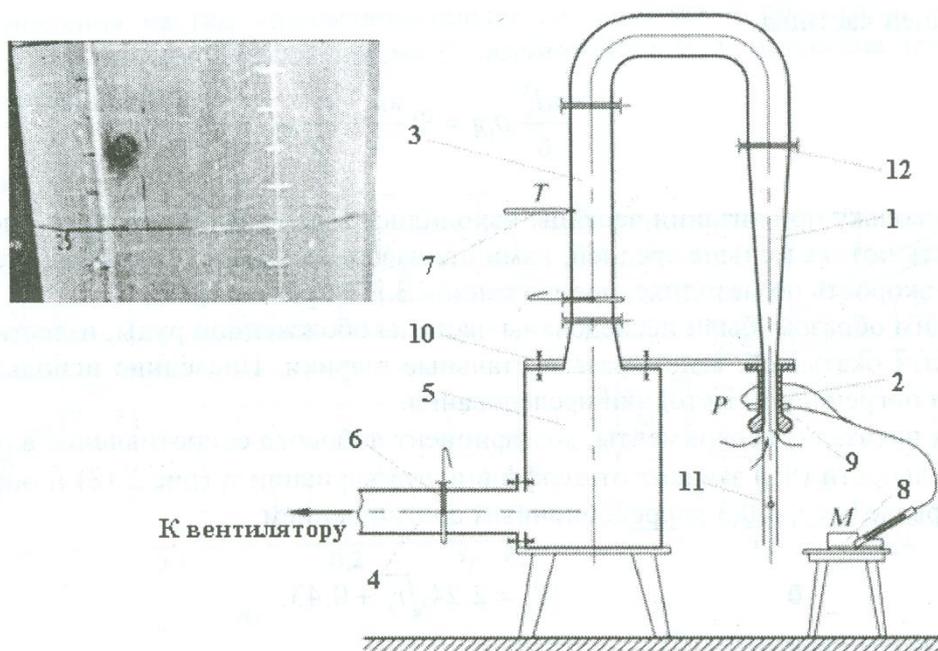


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки для исследования витания твердых частиц [58]: 1 – коническая труба; 2 – измерительный коллектор; 3,4 – воздуховоды; 5 – камера; 6 – шибер; 7 – термометр; 8 – микроманометр; 9 – штуцеры; 10 – кронштейны; 11 – отвес; 12 – решетка

Предложенная установка использована для определения скорости витания частиц обожженной руды, известняка, железорудных окатышей, агломерата и стальных шариков. Получены зависимости для определения коэффициента лобового сопротивления вышеуказанных частиц различных размеров.

В лаборатории СПбГАСУ запроектирована и смонтирована экспериментальная установка для исследования [66]:

- скоростей витания монодисперсного материала в вертикальном трубопроводе (рисунок 2.4);
- скоростей транспортирования монодисперсного материала по наклонному и горизонтальному трубопроводу.

В экспериментальную установку в зависимости от исследований могут быть внесены изменения.

Для исследования скоростей витания монодисперсного материала устанавливается вертикальный трубопровод переменного сечения.

При экспериментальных исследованиях движения монодисперсного материала по наклонному трубопроводу воздуховод переменного сечения заменяется на воздуховод постоянного сечения, для изменения угла наклона воздуховода от вертикального до горизонтального с шагом  $15^\circ$  использовано координатное устройство.

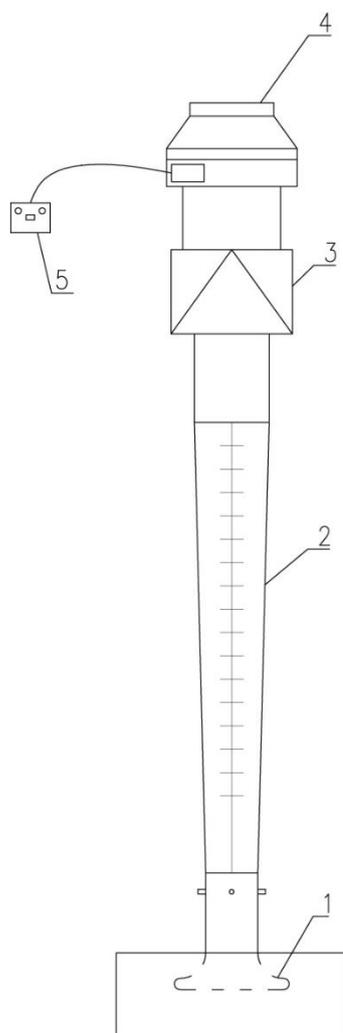


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки для определения скорости витания: 1 – коллектор входной, 2 – труба витания с прозрачным участком для наблюдений, 3 – фильтр, 4 – вентилятор, 5 – лабораторный автотрансформатор

Установка оборудована вентилятором, выполненном в корпусе из оцинкованного стального листа, привод осуществляется с помощью встроенного в радиальное рабочее колесо двигателя с внешним ротором 4 марки *Rosenberg R200*.

Технические характеристики:

– максимальное рабочее давление, Па	– 450;
– максимальное количество перемещаемого воздуха, м <sup>3</sup> /ч	– 900;
– рабочее напряжение вентилятора, В	– 230;
– мощность, кВт	– 0,12/0,15;
– число оборотов рабочего колеса, об/мин	– 2430.

Плавное изменение числа оборотов рабочего колеса вентилятора осуществляется лабораторным автотрансформатором ЛАТР (5). Для защиты вентилятора от попадания в него твердых частиц установлен фильтр 3 для круглых каналов марки «Арктос» ФЛК 160 (габаритные размеры  $d = 160$  мм,  $h = 265$  мм,  $b = 235$  мм, вес 2 кг). Фильтрующий материал выполнен в виде панели из синтетического волокна и имеет класс очистки G3.

За плавным входным коллектором 1 (рисунок 2.5), обеспечивающим за собой равномерное поле скоростей, внутренний профиль которого очерчен по лемнискате Бернулли, измеряется статическое давление.

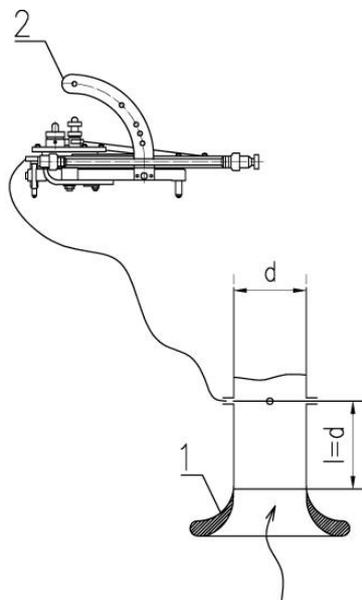


Рисунок 2.5 – Измерение средней скорости по коллектору: 1 – коллектор входной, 2 – микро-манометр

Измерение средней скорости воздуха по коллектору,  $w$  м/с, производится следующим образом. Статическое давление больше динамического в этом се-

чении на величину малых потерь на вход через коллектор и на трение в коротком патрубке. Эти потери при плавном очертании коллектора и патрубка длиной в калибр могут быть оценены в пределах 4% от динамического давления[46], т.е.  $p = 1,04 p_{\text{дин}} = 1,04 w^2 \left( \frac{\rho}{2} \right)$ , откуда  $w = \sqrt{\frac{p \cdot 2}{1,04 \rho}}$ , если  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ ,

то  $w = 1,27 \sqrt{p}$ .



Рисунок 2.6. – Экспериментальная установка

Измерения выполнялись многопредельным с наклонной трубкой микроманометром ММН-2400. Микроманометр предназначен для измерения избыточного, вакуумметрического давления и разности давлений, в пределах до 2400 Па при статическом давлении не более 10000 Па.

Технические характеристики:

– диапазон измерений, Па	– 2400;
– класс точности	– 1;
– цена деления, мм	– 1;
– габаритные размеры, мм	– 432×207×200.

Вертикальный воздуховод был смонтирован из отдельных труб:  $d = 100$  мм,  $d = 160$  мм и конусной части (труба витания 2 с углом конусности  $3^\circ$ , при котором происходит безотрывное течение потока). Изготовлен трубопровод из стальных холоднокатаных листов толщиной 0,8 мм. Для наблюдения за движением материала и проведения съемки труба витания имеет вертикальный прозрачный участок, выполненный из оргстекла, задняя стенка трубы покрыта белой краской для лучшего наблюдения за витанием частиц. На конусе нанесена шкала с указанием диаметров воздуховода, начало которой совпадает с нижним основанием конуса. После монтажа весь трубопровод был тщательно герметизирован.

Учитывая преобладание мелкокусковых фракций, теряемых в виде отходов и просыпей при производстве цемента и сухих строительных смесей, а также особенности лабораторной установки, для проведения эксперимента приняты шарообразные частицы диаметром 2,5; 5; 10 мм и плотностью 400 и 800 кг/м<sup>3</sup>.

Количество подаваемого в трубопровод материала определялось путем взвешивания на весах серии *AND* модели *GR-200*. Наименьший предел взвешивания 10 мг; наибольший предел взвешивания 210 г, цена деления  $d = 0,1$  мг, цена поверочного деления  $e = 1$  мг. Погрешность во взвешивании на весах не превышала 0,05 мг.

## 2.2 Методика проведения экспериментов

Методика проведения измерений основана на стандартных методах аэродинамических испытаний ГОСТ 12.3.018-79 [23].

Экспериментальные исследования скорости витания твердой частицы проведены в следующей последовательности:

1. До начала проведения исследований рассчитана теоретическая величина скорости витания частицы с известными значениями плотности и диаметра по формуле [27] (таблица 1.6)  $w_{\text{вит}} = 5,7 \sqrt{d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}}}}$ , далее по формуле

$p = 1,04 w^2 \left( \frac{\rho}{2} \right)$ , определено значение статического давления на коллекторе, соответствующие этой скорости для условий опытной установки.

2. После включения установки выполнено регулирование потока воздуха до достижения величины статического давления по пункту 1 за счет плавного изменения числа оборотов рабочего колеса вентилятора с помощью трансформатора ЛАТР.

3. Измерения статического давления произведены по показаниям микроманометра на коллекторе.

4. В установку помещалась исследуемая частица.

5. При достижении «зависающего» положения частицы фиксировался диаметр конической трубы на уровне витания, проводились измерения статического давления по показаниям микроманометра и определялись скорости движения воздуха в коллекторе.

6. Далее произведен перерасчет скорости движения воздуха, соответствующей диаметру  $w_2 = w_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2$  конической трубы на уровне витания частицы.

Для определения скорости витания совокупности твердых частиц экспериментальные исследования выполнены на основании процедуры планирования эксперимента (раздел 2.3) в следующей последовательности:

1. В коническую трубу вводятся твердые частицы;
2. Визуально через прозрачный участок трубопровода (рисунок 2.7) определялось «зависающее» положение совокупности этих частиц;
3. Фиксировался диаметр конической трубы на уровне зависания и проводились измерения статического давления по показаниям микроманометра и определялись скорости движения воздуха в коллекторе.
4. Далее выполняется перерасчет скорости движения воздуха, соответствующей диаметру конической трубы на уровне зависания частиц.



Рисунок 2.7 – «Зависание» положение материала

Эксперименты проводились с материалами, предоставленными кафедрой технологии строительных материалов и метрологии СПбГАСУ: тяжелый бетон плотностью  $2300 \text{ кг/м}^3$ , мелкозернистый бетон плотностью  $2200 \text{ кг/м}^3$ , легкий бетон плотностью  $1500 \text{ кг/м}^3$ , газобетон плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$  и пенобетон плотностью  $400 \text{ кг/м}^3$ . Подготовка материала заключалась в механическом измельчении блоков из ячеистого бетона. Первичное измельчение –

дробление в щековой дробилке ДЩ 80x150, полученный материал просеивался через стандартный набор сит с сетками 20; 25; 30; 35; 40 мм. Вторичному измельчению подвергались частицы 20 мм и менее в мельнице вибрационной ВМР-25С, полученный материал просеивался через стандартный набор сит с сетками 15; 10; 7,5; 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,16 мм (рисунок 2.8). Кроме того, вручную производилась незначительная дошлифовка частиц. В результате был получен готовый к проведению опытов монодисперсный материал соответствующих фракций.



Рисунок 2.8 – Монодисперсный материал

Как отмечалось выше, проблеме определения скорости витания одиночной твердой частицы посвящено значительное количество работ, в частности [12, 16, 27, 44, 48, 51, 57, 87, 108, 109, 115 и др.]. Тем не менее, с целью оценки адекватности разработки лабораторной установки выполнены экспериментальные исследования скорости витания одиночной частицы бетона, с последующей проверкой соответствия результатов данным известных экспериментов.

На основании предварительных экспериментов был определен диапазон плотностей и концентраций материала, в котором возможно проводить эксперименты на установке. Из-за того, что труба витания имеет прозрачный уча-

сток, выполненный из оргстекла, на котором при движении материала накапливаются статические заряды [21], частицы диаметром менее 2,5 мм прилипали к этому прозрачному участку. Поэтому опыты проводились с частицами размером 2,5 мм; 5 мм; 7,5 мм; 10 мм и 15 мм.

Предварительные эксперименты проводились в два этапа: первая серия экспериментов для одной частицы диаметром 2,5 мм; 5 мм; 7,5 мм; 10 мм; 15 мм и плотностью бетона 400 кг/м<sup>3</sup>, вторая – для одной частицы диаметром 5 мм с различной плотностью 2300 кг/м<sup>3</sup>, 2200 кг/м<sup>3</sup>, 1500 кг/м<sup>3</sup>, 800 кг/м<sup>3</sup>, 400 кг/м<sup>3</sup>.

Результаты замеров скоростей витания при различных диаметрах частиц, приведены в таблице А.1, приложение А. После чего проведена обработка экспериментальных данных.

В каждой серии экспериментов проведены по три параллельных измерения (таблица А.3, приложение А), по результатам которых определено среднее арифметическое для каждого из диаметров

$$\bar{w} = \frac{w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n}, \quad (2.1)$$

где  $n$  – количество параллельных измерений,  $n = 3$ .

Вычислен квадрат разностей между средними арифметическими и результатами параллельных измерений  $(w_i - \bar{w})^2$ .

Далее найдены дисперсии воспроизводимости параллельных измерений

$$S_i^2 = \frac{(w_i - \bar{w})^2}{f}, \quad (2.2)$$

при числе степеней свободы  $f=n-1, f=3-1=2$ .

Вычислена сумма дисперсии воспроизводимости  $\sum_{i=1}^3 S_i^2 = 0,004 + 0,220 + 0,359 + 0,234 + 0,586 = 1,402$ .

Из таблицы А.3, приложение А видно, что самое большое значение дисперсии в опыте с частицами диаметром 2,5 мм. Следовательно, необходимо проверить однородность дисперсий, для этого вычислено опытное значение критерия Кохрена:

$$G_{\text{оп}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2} = \frac{0,586}{1,402} = 0,418, \quad (2.3)$$

Сравниваем полученное значение однородности дисперсий с критическим значением Кохрена  $G_{\text{кр}} = 0,516$ . Так как  $G_{\text{оп}} < G_{\text{кр}}$ , дисперсии однородны и данный эксперимент отбрасывать нельзя.

После проверки однородности измерений вычислялась средняя дисперсия воспроизводимости

$$S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i^2}{m} = \frac{1,402}{5} = 0,281, \quad (2.4)$$

где  $m$  – число сравниваемых частот (т.е. пять значений диаметров).

Далее выполнена проверка адекватности полученной зависимости. Вычислен квадрат разности между опытными и расчетными значениями, полученными по формуле [27] таблица 1.6,  $(\bar{w}_{\text{вит}} - \hat{w}_{\text{рч}})^2$ , найдена сумма квадратов разности. После чего вычислена дисперсия, характеризующая неадекватность экспериментальных данных результатам расчетов по формуле.

$$S_{le}^2 = \frac{n \sum_{i=1} (\bar{w}_{\text{вит}} - \hat{w}_{\text{рч}})^2}{f} = \frac{3 \cdot 0,5803}{4} = 0,43, \quad (2.5)$$

где  $m$  – число отдельных серий измерений  $m = 5$ ;  $f = m - g$  – число степеней свободы  $f = 5 - 1 = 4$ ;  $g$  – число коэффициентов регрессии  $g = 1$ ;  $\bar{w}$  – среднее значение результатов измерений;  $\hat{w}_{\text{рч}}$  – расчетное значение.

Вычисляем опытное значение  $F$  – критерия Фишера и сравниваем его с критическим  $F_{\text{кр}}$ :

$$F_{\text{оп}} = \frac{S_{Le}^2}{S_e^2} = \frac{0,43}{0,2805} = 1,55. \quad (2.6)$$

По результатам расчетов опытное значение критерия Фишера  $F = 1,55$  меньше критического, равного 3,48, таким образом, доказана адекватность экспериментальных данных результатам расчетов.

Получена удовлетворительная сходимость экспериментальных данных автора с результатами расчета по предложенным формулам (таблица 1.6) [27, 44, 48, 51, 57, 87, 108, 108, 115] (рисунок 2.9).

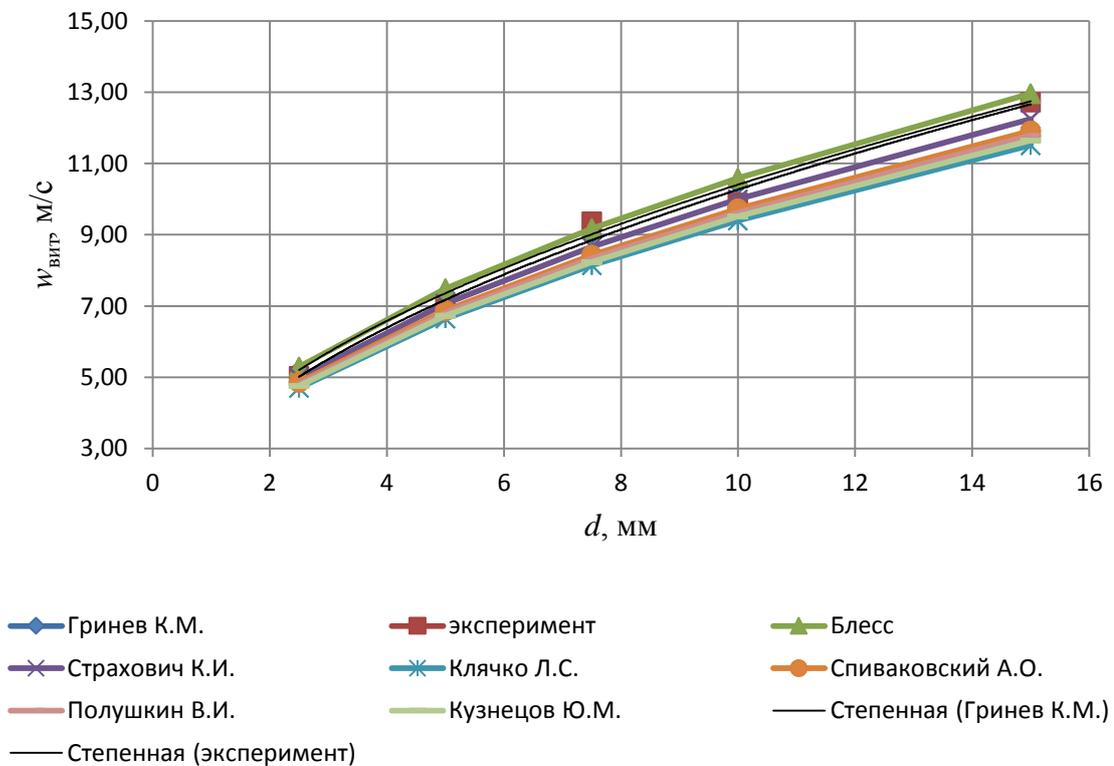


Рисунок 2.9 – Зависимости скорости витания от диаметра частицы

В результате замеров скоростей витания для одной частицы диаметром 5 мм с различной плотностью 2300 кг/м<sup>3</sup>, 2200 кг/м<sup>3</sup>, 1500 кг/м<sup>3</sup>, 800 кг/м<sup>3</sup>, 400 кг/м<sup>3</sup>, была составлена таблица А.2, приложение А.

Обработка экспериментальных данных аналогична исследованиям скоростей витания при различных диаметрах частиц.

В каждой серии экспериментов проведены по три параллельных измерения таблица А.4, приложение А. По результатам параллельных измерений определено среднее арифметическое для каждой из плотностей по формуле (2.1). После вычислений квадрата разности между средними арифметическими и результатами параллельных измерений по формуле (2.2) найдена дисперсия воспроизводимости параллельных измерений  $S_i^2$ .

Вычислена                      сумма                      дисперсии                      воспроизводимости

$$\sum_{i=1}^3 S_i^2 = 1,2584 + 1,1488 + 0,2260 + 0,0685 + 0,2339 = 2,9355.$$

Из таблицы А.4, приложение А видно, что самое большое значение дисперсии в опыте с частицами плотностью  $2300 \text{ кг/м}^3$ , проверена однородность дисперсий по формуле (2.3):

$$G_{\text{оп}} = \frac{1,2584}{2,9355} = 0,4287.$$

Сравниваем полученное значение однородности дисперсий с критическим значением Кохрена  $G_{\text{кр}} = 0,516$ . Так как  $G_{\text{оп}} < G_{\text{кр}}$ , дисперсии однородны и пятый эксперимент отбрасывать нельзя.

После проверки однородности измерений вычислялась средняя дисперсия воспроизводимости по формуле (2.4):

$$S_e^2 = \frac{2,9355}{5} = 0,5871.$$

Далее выполнена проверка адекватности полученной зависимости. Вычислен квадрат разности между опытными и расчетными значениями отклика  $(\bar{y} - \hat{y})^2$ , найдена сумма квадратов разности по формуле (2.5):

$$S_{Le}^2 = \frac{3 \cdot 0,8331}{4} = 0,6248.$$

Сравниваем опытное и критическое значение  $F$  – критерия Фишера по формуле (2.6):

$$F_{\text{оп}} = \frac{0,6248}{0,5871} = 1,06.$$

По результатам расчетов опытное значение критерия Фишера  $F = 1,06$  меньше критического, равного 3,48, таким образом, доказана адекватность экспериментальных данных результатам расчетов.

На рисунке 2.10 приведены результаты исследований влияния плотности частицы в диапазоне от 400 до 2300 кг/м<sup>3</sup> на скорость витания твердой частицы. Доказана адекватность экспериментальных данных результатам расчетов по формулам таблицы 1.6 [27, 44, 48, 51, 57, 87, 108, 115].

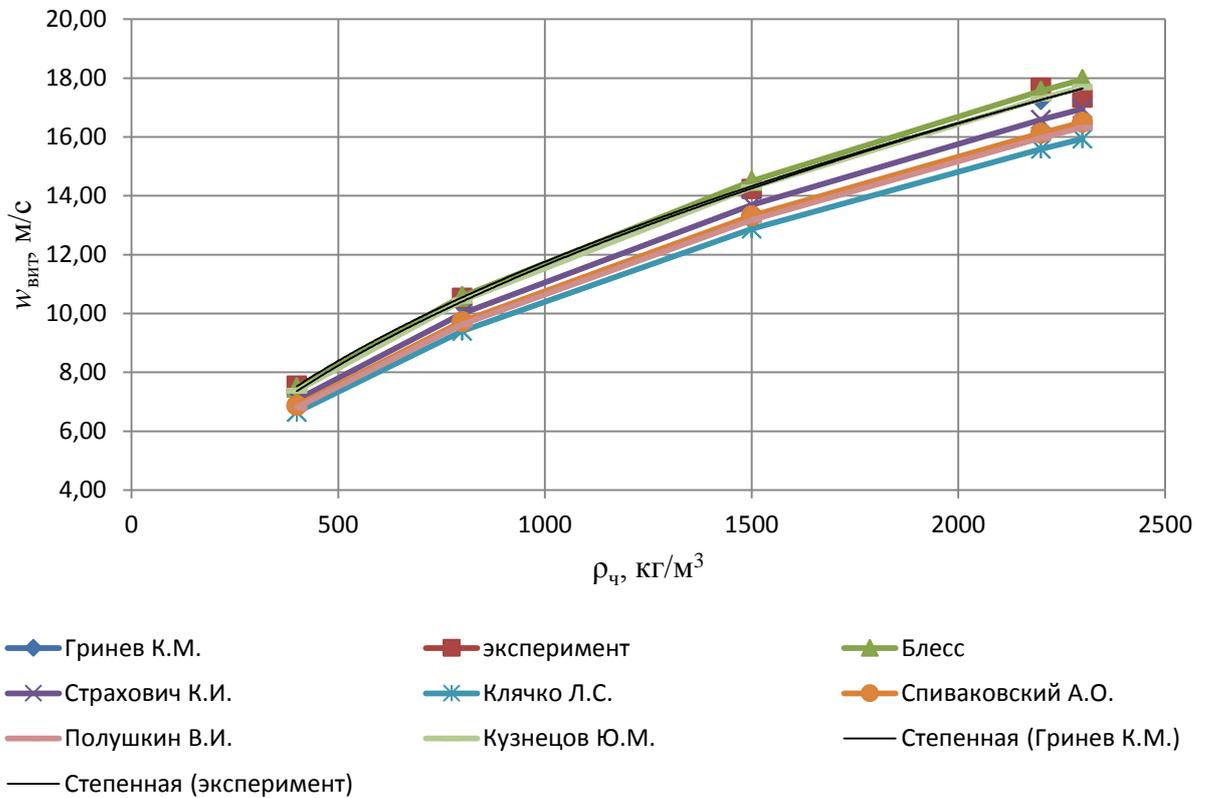


Рисунок 2.10 – Зависимость скорости витания от плотности частицы

Таким образом, установка может быть использована для проведения полного трехфакторного эксперимента.

### 2.3 Проведение полного трехфакторного эксперимента

Учитывая достаточно большой диапазон размеров (0,05 мкм – 60 мм) и плотности (300 – 3000 кг/м<sup>3</sup>) материалов, теряемых в виде отходов и просыпей при производстве цемента и сухих строительных смесей, а также особенности лабораторной установки, для проведения эксперимента приняты шарообразные частицы диаметром 2,5; 5; 10 мм и плотностью 400 и 800 кг/м<sup>3</sup>.

Основной целью проводимых исследований на смонтированной установке является определение влияния таких факторов как плотность материала, размер частиц и их массовая концентрация на скорость витания. Результатами проводимых исследований являются: определение совместного действия факторов на скорость витания; получение регрессионных зависимостей с учетом взаимодействия экспериментальных факторов [66].

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 таблице 2.1 приведены уровни варьирования факторов.

Таблица 2.1. – Уровни варьирования факторов

Фактор	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
Плотность материала частиц ( $x_1$ ), кг/м <sup>3</sup>	400	600	800	200
Размер частиц ( $x_2 \cdot 10^{-3}$ ), м	2,5	6,25	10	3,75
Массовая концентрация ( $x_3$ ), кг/кг	0,083	0,413	0,744	0,331

Для удобства записи условий эксперимента, обработки экспериментальных данных и получения регрессионных зависимостей, уровни факторов приведены к безразмерному виду:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{\rho - 600}{200}, \\ x_2 &= \frac{d - 6,25 \cdot 10^{-3}}{0,33058}, \\ x_3 &= \frac{\mu - 0,413}{0,33058} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

где  $\rho$ ,  $d$ ,  $\mu$  – интервалы изменения значений факторов.

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

Составлена матрица планирования полного трехфакторного эксперимента (таблица 2.2) [2, 56, 60, 119].

Таблица 2.2. – Матрица полного трехфакторного эксперимента

№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	-	-	+	-
3	+	+	-	+	-	+	-	-
4	+	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	+	-	+	-	-	-
6	+	-	+	-	-	+	-	+
7	+	+	-	-	-	-	+	+
8	+	-	-	-	+	+	+	-

Оценка дисперсии воспроизводимости измерений в каждой точке и серии опытов производилась по известным методам обработки экспериментальных данных [2, 56, 60, 119].

Для оценки дисперсии воспроизводимости в каждой точке проводим по

три параллельных измерения и по формуле  $\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ ,

где  $n$  – количество параллельных измерений,  $n=3$ .

Вычисляем средние арифметические параллельных измерений  $\bar{y}$ . Вычисляем квадраты разностей между найденными средними арифметическими

$\bar{y}$  и результатами параллельных измерений  $y_1, y_2, y_3$  и сумму квадратов разностей  $\sum_{i=1}^3 (y_i - \bar{y})^2$ .

Вычисляем дисперсии воспроизводимости каждой серии опытов  $\sum_{i=1}^3 S_i^2$ ,

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{f},$$

где  $n$  – число параллельных измерений;  $f=m-g$  – число степеней свободы;  $m$  – число отдельных серий измерений;  $g$  – число коэффициентов регрессии;  $y_i$  – текущее значение случайной величины.

## 2.4 Обработка экспериментальных данных

Результаты расчетов заносим в таблицу 2.3.

Таблица 2.3. – Результаты эксперимента

№ опыта	Параллельные измерения			$\bar{y}$	$(y_1 - \bar{y})^2$	$(y_2 - \bar{y})^2$	$(y_3 - \bar{y})^2$	$S_i^2$ $y_1$
	$y_1$	$y_2$	$y_3$					
1	12,75	12,07	12,07	12,30	0,2055	0,0514	0,0514	0,1541
2	9,75	9,25	9,41	9,47	0,0784	0,0484	0,0036	0,0652
3	7,11	7,33	7,33	7,26	0,0215	0,0054	0,0054	0,0161
4	5,03	5,34	5,34	5,24	0,0427	0,0107	0,0107	0,0320
5	14,55	14,55	14,34	14,48	0,0049	0,0049	0,0196	0,0147
6	14,34	14,34	14,29	14,32	0,0003	0,0003	0,0011	0,0008
7	7,55	7,76	7,55	7,62	0,0049	0,0196	0,0049	0,0147
8	7,34	7,44	7,44	7,41	0,0044	0,0011	0,0011	0,0033

Из таблицы 2.3 видно, что дисперсия первого опыта превышает значение дисперсий остальных опытов. Следовательно, этот опыт следует проверить на однородность дисперсий по критерию Кохрена

$$G_{\text{оп}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2} = \frac{0,1541}{0,301} = 0,512,$$

где  $S^2_{max}$  – максимальная дисперсия воспроизводимости;  $\sum_{i=1}^n S_i^2$  – сумма дисперсий воспроизводимости опытов.

Поскольку значение критерия Кохрена для пятипроцентного уровня значимости  $G_{кр} = 0,516$ , дисперсии можно считать однородными, и результаты первого опыта отбрасывать нельзя.

Для получения интерполяционной зависимости, характеризующей экспериментальные данные, используем уравнение регрессии:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

Рассчитываем значения коэффициентов регрессии по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{m},$$

где  $x_i$  – знак фактора в соответствующем ему столбце (таблица 2.2).

Определяем значимость коэффициентов регрессии, вычислив среднюю дисперсию воспроизводимости:

$$S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 S_i^2}{m} = \frac{0,3011}{8} = 0,0376.$$

Вычисляем дисперсию коэффициентов регрессии:

$$S^2(b) = \frac{S_e^2}{m} = \frac{0,0376}{8} = 0,0047.$$

Определяем опытные значения  $t$ -критерия по выражению:

$$t_{оп} = \frac{|b_i|}{\sqrt{S^2(b)}},$$

где  $S^2_{(b)}$  – дисперсия коэффициентов регрессии.

Результаты расчетов заносим в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Определение  $t$ -критерия для коэффициентов регрессии

Коэффициент регрессии	Значения коэффициентов	$t$ -критерий
$b_0$	9,76	
$b_1$	0,65	9,5
$b_2$	2,88	42,01
$b_3$	-1,20	17,44
$b_{12}$	0,09	1,37
$b_{13}$	0,56	8,16
$b_{23}$	0,56	8,16
$b_{123}$	0,018	0,26

Экспериментальное значение  $t$ -критерия для совместного действия факторов  $x_1x_2$  и  $x_1x_2x_3$  (таблица 2.4) меньше критического значения, равного для пятипроцентного уровня значимости 2,3. Следовательно, факторы совместного действия  $x_1x_2$  и  $x_1x_2x_3$  мало влияют на процесс, и их можно исключить из уравнения.

Получаем уравнение регрессии:

$$\hat{y} = 9,76 + 0,65x_1 + 2,88x_2 - 1,20x_3 + 0,09x_1x_2 + 0,56x_1x_3 - 0,56x_2x_3 + 0,018x_1x_2x_3. \quad (2.8)$$

Значимость коэффициентов регрессии в уравнении 2.1 оценивается с помощью  $t$ -критерия.

Опытные значения  $t$ -критерия при совместном действии факторов  $x_1x_2$  и  $x_1x_2x_3$  меньше критического значения, равного для пятипроцентного уровня значимости 2,3. Следовательно, их можно не учитывать.

Окончательно уравнение регрессии принимает вид:

$$y = 9,76 + 0,65x_1 + 2,88x_2 - 1,20x_3 + 0,56x_1x_3 - 0,56x_2x_3. \quad (2.9)$$

Из уравнения 2.9 видно, что на величину скорости витания наибольшее влияние оказывает размер частиц. На рисунке 2.11 представлена значимость составляющих членов уравнения 2.9.

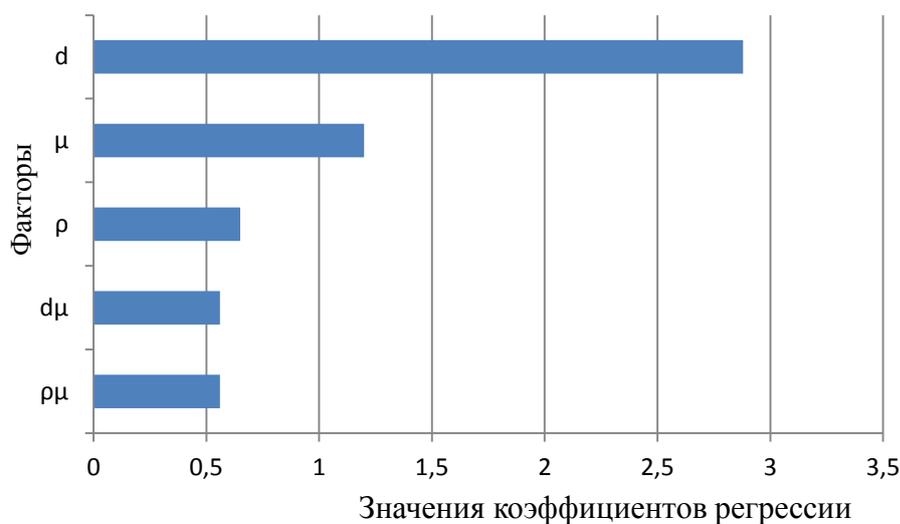


Рисунок 2.11 – Диаграмма значимости отдельных членов уравнения для нахождения скорости витания

Проверяем адекватность полученного уравнения регрессии. Для этого по полученному уравнению вычисляем расчетные значения отклика  $\hat{y}$  и квадрат разности между опытными и расчетными значениями отклика  $(\bar{y} - \hat{y})^2$ . Результаты расчетов приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5– Результаты опытных и расчетных значений отклика

№ опыта	$\bar{y}$	$\hat{y}$	$(\bar{y} - \hat{y})^2$
1	12,30	12,095	0,0407
2	9,47	9,672	0,0407
3	7,26	7,458	0,0407
4	5,24	5,035	0,0407
5	14,48	14,494	0,0002
6	14,32	14,309	0,0002
7	7,62	7,606	0,0002
8	7,41	7,421	0,0002

С использованием данных таблицы 2.5 вычисляем дисперсию, характеризующую неадекватность уравнения регрессии:

$$S_{Le}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^8 (\bar{y} - \hat{y})^2}{f} = \frac{3 \cdot 0,1635}{5} = 0,0981.$$

Вычисляем опытное значение  $F$ - критерия Фишера и сравниваем его с критическим  $F_{кр}$ :

$$F_{он} = \frac{S_{Le}^2}{S_e^2} = \frac{0,0981}{0,0376} = 2,61.$$

Так как опытное значение критерия Фишера  $F=2,61$  меньше критического, равного 2,74, можно сделать вывод, что полученное уравнение адекватно описывает опытные данные.

Выполняем раскодирование факторов, для этого данные уравнения (2.7) подставлены в уравнение (2.9) получаем зависимость для определения скорости витания частиц рассмотренных материалов:

$$w_{вит} = 5,42 - 2,37 \cdot 10^{-4} \rho_{ч} + 955,98d - 5,86\mu + \\ + 8,46 \cdot 10^{-3} \rho_{ч}\mu - 454,11d\mu. \quad (2.10)$$

Определим скорость витания для следующих значений параметров частиц:  $d = 0,0025$  м,  $\rho = 400$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 0,083$  кг/кг.

$$w_{вит} = 5,42 - 2,37 \cdot 10^{-4} \cdot 400 + 955,98 \cdot 0,0025 - 5,86 \cdot 0,083 + \\ + 8,46 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \cdot 0,083 - 454,11 \cdot 0,0025 \cdot 0,083 = 7,4 \text{ м/с},$$

что соответствует экспериментальным данным в таблице 2.5

Результаты экспериментов (таблица А. 5, приложение А) зависимости скорости витания материала от массовой концентрации представлены в таблице 2.6 в сравнении с данными регрессионного анализа [68].

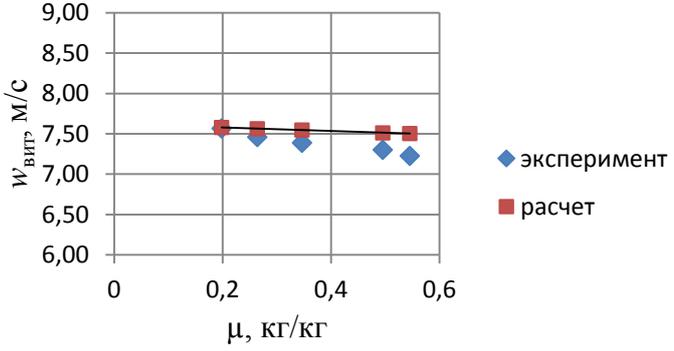
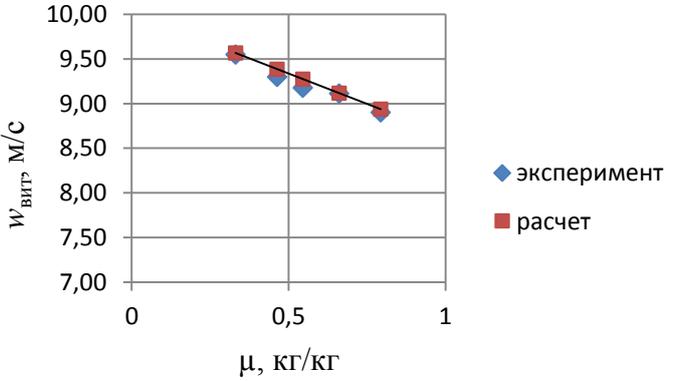
Анализ результатов таблицы 2.6 показывает, что с увеличением массовой концентрации скорость витания частиц уменьшается.

По данным планового эксперимента получены рекомендуемые скорости витания для различных материалов для  $\rho_{ч} = 200 - 900$  кг/м<sup>3</sup> и  $\mu = 0,1 - 1,4$  кг/кг, которые приведены в таблице А.6, приложения А.

Эти результаты могут быть использованы при расчете вакуумных систем обеспыливания с частицами наиболее распространенных сыпучих строительных материалов [107] таблица 2.7.

Таблица 2.6 – Зависимость скорости витания от массовой концентрации

Номер опыта	Плотность частиц, $\rho_{ч}$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр частиц, $d$ , мм	Зависимости																		
1	400	2,5	<p>График зависимости скорости витания от массовой концентрации для опыта 1. Ось Y: <math>W_{\text{вит}}</math>, м/с (5,00-10,00). Ось X: <math>\mu</math>, кг/кг (0-0,8). Данные: эксперимент (синие ромбы), расчет (красные квадраты). Тренд: убывающий.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\mu</math>, кг/кг</th> <th><math>W_{\text{вит}}</math>, м/с (эксперимент)</th> <th><math>W_{\text{вит}}</math>, м/с (расчет)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,1</td><td>7,0</td><td>7,3</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>6,8</td><td>7,0</td></tr> <tr><td>0,3</td><td>6,5</td><td>6,8</td></tr> <tr><td>0,4</td><td>6,0</td><td>6,4</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>5,5</td><td>5,7</td></tr> </tbody> </table>	$\mu$ , кг/кг	$W_{\text{вит}}$ , м/с (эксперимент)	$W_{\text{вит}}$ , м/с (расчет)	0,1	7,0	7,3	0,2	6,8	7,0	0,3	6,5	6,8	0,4	6,0	6,4	0,6	5,5	5,7
$\mu$ , кг/кг	$W_{\text{вит}}$ , м/с (эксперимент)	$W_{\text{вит}}$ , м/с (расчет)																			
0,1	7,0	7,3																			
0,2	6,8	7,0																			
0,3	6,5	6,8																			
0,4	6,0	6,4																			
0,6	5,5	5,7																			
2	400	5	<p>График зависимости скорости витания от массовой концентрации для опыта 2. Ось Y: <math>W_{\text{вит}}</math>, м/с (5,00-10,00). Ось X: <math>\mu</math>, кг/кг (0-0,4). Данные: эксперимент (синие ромбы), расчет (красные квадраты). Тренд: убывающий.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\mu</math>, кг/кг</th> <th><math>W_{\text{вит}}</math>, м/с (эксперимент)</th> <th><math>W_{\text{вит}}</math>, м/с (расчет)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,05</td><td>9,5</td><td>9,7</td></tr> <tr><td>0,15</td><td>9,0</td><td>9,3</td></tr> <tr><td>0,25</td><td>8,8</td><td>9,1</td></tr> <tr><td>0,35</td><td>8,3</td><td>8,6</td></tr> </tbody> </table>	$\mu$ , кг/кг	$W_{\text{вит}}$ , м/с (эксперимент)	$W_{\text{вит}}$ , м/с (расчет)	0,05	9,5	9,7	0,15	9,0	9,3	0,25	8,8	9,1	0,35	8,3	8,6			
$\mu$ , кг/кг	$W_{\text{вит}}$ , м/с (эксперимент)	$W_{\text{вит}}$ , м/с (расчет)																			
0,05	9,5	9,7																			
0,15	9,0	9,3																			
0,25	8,8	9,1																			
0,35	8,3	8,6																			
3	400	10	<p>График зависимости скорости витания от массовой концентрации для опыта 3. Ось Y: <math>W_{\text{вит}}</math>, м/с (4,00-14,00). Ось X: <math>\mu</math>, кг/кг (0-1,5). Данные: эксперимент (синие ромбы), расчет (красные квадраты). Тренд: убывающий.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\mu</math>, кг/кг</th> <th><math>W_{\text{вит}}</math>, м/с (эксперимент)</th> <th><math>W_{\text{вит}}</math>, м/с (расчет)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,2</td><td>12,8</td><td>13,0</td></tr> <tr><td>0,4</td><td>11,5</td><td>11,8</td></tr> <tr><td>0,7</td><td>10,2</td><td>9,8</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>7,8</td><td>7,6</td></tr> <tr><td>1,4</td><td>6,2</td><td>5,2</td></tr> </tbody> </table>	$\mu$ , кг/кг	$W_{\text{вит}}$ , м/с (эксперимент)	$W_{\text{вит}}$ , м/с (расчет)	0,2	12,8	13,0	0,4	11,5	11,8	0,7	10,2	9,8	1,0	7,8	7,6	1,4	6,2	5,2
$\mu$ , кг/кг	$W_{\text{вит}}$ , м/с (эксперимент)	$W_{\text{вит}}$ , м/с (расчет)																			
0,2	12,8	13,0																			
0,4	11,5	11,8																			
0,7	10,2	9,8																			
1,0	7,8	7,6																			
1,4	6,2	5,2																			

4	800	2,5	
5	800	5	

На рисунке 2.12 представлены трехмерные зависимости скорости витания от концентрации и размера частиц при плотности материала  $\rho = 200$  кг/м<sup>3</sup> (а),  $\rho_{\text{ч}} = 300$  кг/м<sup>3</sup> (б),  $\rho_{\text{ч}} = 400$  кг/м<sup>3</sup> (в),  $\rho_{\text{ч}} = 500$  кг/м<sup>3</sup> (г),  $\rho_{\text{ч}} = 600$  кг/м<sup>3</sup> (д),  $\rho_{\text{ч}} = 700$  кг/м<sup>3</sup> (е),  $\rho_{\text{ч}} = 800$  кг/м<sup>3</sup> (ж),  $\rho_{\text{ч}} = 900$  кг/м<sup>3</sup> (з), полученные на основании регрессионного анализа. При построении зависимостей использованы принципы, изложенные в работе Pandelidis, D., Anisimov S. [129]. В инженерной практике можно воспользоваться данными зависимостями для определения скорости витания твердых частиц различных размеров и массовой концентрации соответственно при плотности  $\rho_{\text{ч}} = 200$  кг/м<sup>3</sup> (а),  $\rho_{\text{ч}} = 300$  кг/м<sup>3</sup> (б),  $\rho_{\text{ч}} = 400$  кг/м<sup>3</sup> (в),  $\rho_{\text{ч}} = 500$  кг/м<sup>3</sup> (г),  $\rho_{\text{ч}} = 600$  кг/м<sup>3</sup> (д),  $\rho_{\text{ч}} = 700$  кг/м<sup>3</sup> (е),  $\rho_{\text{ч}} = 800$  кг/м<sup>3</sup> (ж),  $\rho_{\text{ч}} = 900$  кг/м<sup>3</sup> (з).

Таблица 2.7 – Сыпучие строительные материалы

№п/п	Строительный материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Засыпки		
1.	Гравий керамзитовый	200; 300; 350; 400; 450; 500; 600; 700
2.	Гравий шунгизитовый (ГОСТ 9755)	400; 450; 500; 600; 700
3.	Щебень шлакопемзовый и аглопоритовый (ГОСТ 9757)	400; 450; 500; 600; 700; 800
4.	Пористый гравий с остеклованной оболочкой из доменного и ферросплавного шлаков (ГОСТ 25820)	400; 500; 600; 700
5.	Щебень и песок из перлита вспученного (ГОСТ 10832)	300; 350; 400; 500
6.	Вермикулит вспученный (ГОСТ 12865)	200
Бетоны на заполнителях из пористых горных пород		
7.	Бетон на литоидной пемзе	800
8.	Бетон на вулканическом шлаке	800
9.	Керамзитобетон на керамзитовом песке	500; 600; 800
10.	Керамзитобетон на кварцевом песке с умеренной поризацией	800
11.	Керамзитобетон на перлитовом песке	800
12.	Керамзитобетон беспесчаный	300; 400; 500; 600; 700
13.	Перлитобетон	600; 800
14.	Вермикулитобетон	300; 400; 600; 800
Бетоны особо легкие на пористых заполнителях и ячеистые		
15.	Полистиролбетон на портландцементе (ГОСТ Р 51263)	150; 200; 250; 300; 350; 400; 500; 600
16.	Полистиролбетон модифицированный на шлакопортландцементе	200; 300; 400; 500
17.	Газо-пенобетон на цементном вяжущем	400; 600; 800; 1000
18.	Газо-пенобетон на известняковом вяжущем	500; 600; 800; 1000
19.	Газо и пенозолобетон на цементном вяжущем	800; 1000

Изучению движения твердых частиц в газообразной среде посвящен ряд работ, связанных с процессами осаждения, в частности Кафаровым В.В. [47]. При моделировании гидродинамических процессов осаждения на основе решения дифференциальных уравнений Навье-Стокса и неразрывности получены следующие важные результаты. Для шарообразной частицы определены значение общего коэффициента сопротивления среды при ее турбулентном движении ( $500 < Re < 2 \cdot 10^5$ )  $c = 0,43$  (таблица 1.4) и критериальная

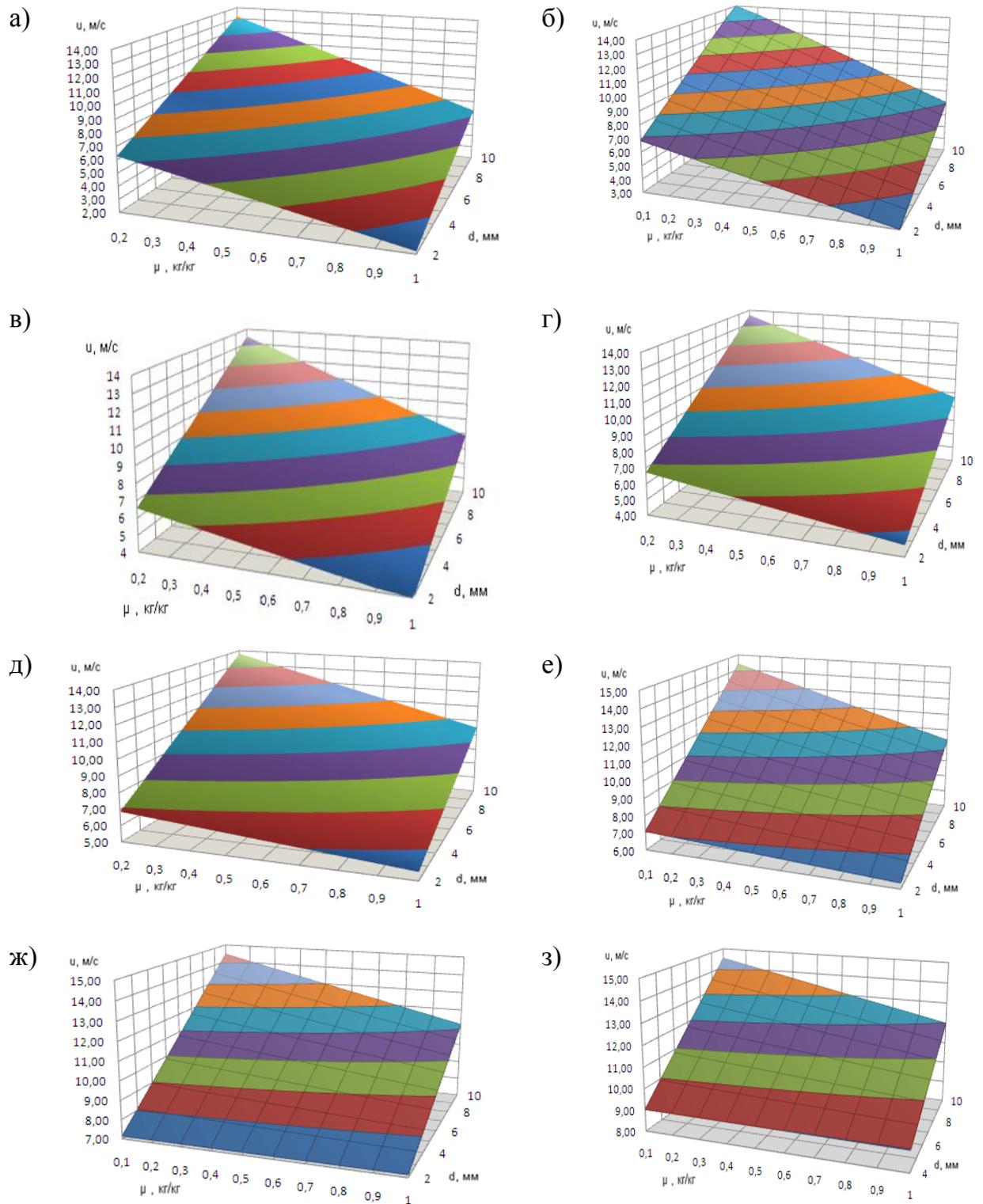


Рисунок 2.12 – Трехмерные зависимости скорости витания от концентрации и размера при плотности материала  $\rho_{\text{ч}} = 200 \text{ кг/м}^3$  (а),  $\rho_{\text{ч}} = 300 \text{ кг/м}^3$  (б),  $\rho_{\text{ч}} = 400 \text{ кг/м}^3$  (в),  $\rho_{\text{ч}} = 500 \text{ кг/м}^3$  (г),  $\rho_{\text{ч}} = 600 \text{ кг/м}^3$  (д),  $\rho_{\text{ч}} = 700 \text{ кг/м}^3$  (е),  $\rho_{\text{ч}} = 800 \text{ кг/м}^3$  (ж),  $\rho_{\text{ч}} = 900 \text{ кг/м}^3$  (з)

зависимость, описывающая начало режима осаждения твердой частицы:

$$cRe^2 = \frac{4}{3}Ar. \quad (2.11)$$

При  $c = 0,43$  уравнение примет вид:

$$Re = 1,74Ar^{0,5}. \quad (2.12)$$

Критерий Архимеда определен по формуле:

$$Ar = \frac{gd_{\text{ч}}^3}{\nu^2} \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho}{\rho}, \quad (2.13)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Несмотря на то, что скорость свободного осаждения частицы [47], меньше, чем скорость витания как одиночной шарообразной частицы, так и совокупности шарообразных частиц, тем не менее, используем принятый в работах [47, 98] подход для обработки результатов исследований скоростей витания твердых частиц в воздушном потоке, позволяющий получить зависимость скорости витания через критериальное уравнение.

Общий вид критериального уравнения запишем в виде:

$$Re_{\text{к}} = f(Ar, \mu). \quad (2.14)$$

После обработки получено следующее критериальное уравнение для шарообразных частиц:

$$Re_{\text{к}} = 1,74Ar^{0,5}(1 + \mu)^{-0,5}. \quad (2.15)$$

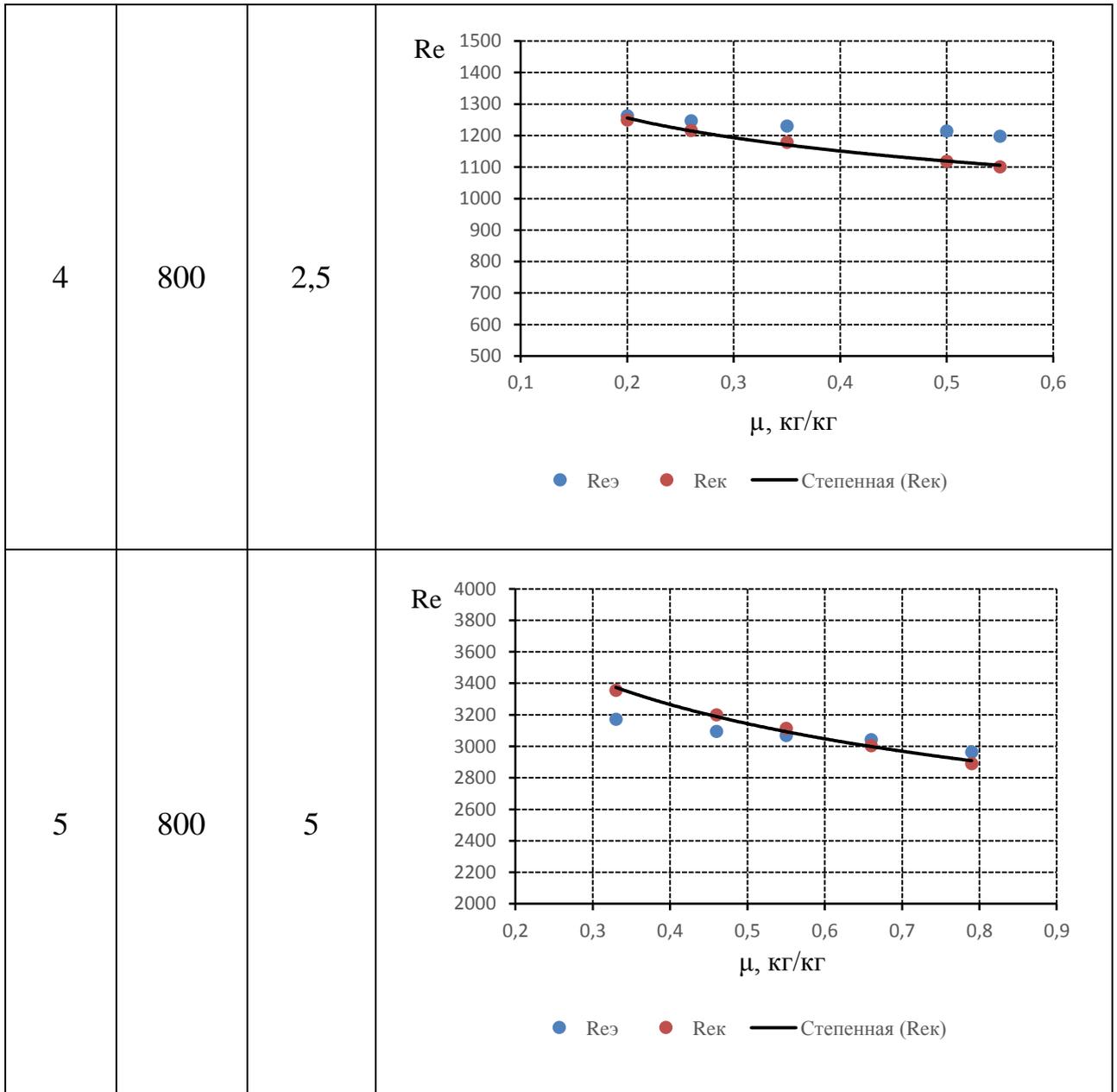
В таблице 2.8 приведены экспериментальные значения числа Рейнольдса  $Re_{\text{э}}$  и результаты обработки данных по формуле (2.15)  $Re_{\text{к}}$  для частиц диаметром 2,5; 5; 10 мм и плотностью 400 и 800 кг/м<sup>3</sup>.

Уравнение 2.15 обобщает влияние различных факторов на скорость витания группы твердых частиц и может быть использовано для расчета широкого круга задач в области аспирации и пневмотранспорта.

Таблица 2.8 – Значения числа Рейнольдса  $Re_3$  и результаты обработки данных по формуле (2.15)  $Re_k$

Номер опыта	Плотность частицы, $\rho_{ч}$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр частиц, $d$ , мм	Зависимости критерия $Re$ от массовой концентрации
1	400	2,5	<p>Graph 1: Plot of Reynolds number (<math>Re</math>) vs mass concentration (<math>\mu</math>, кг/кг) for experiment 1. The y-axis ranges from 0 to 2000, and the x-axis from 0 to 0,6. Blue dots represent <math>Re_3</math> and red dots represent <math>Re_k</math>. A black line shows a power-law fit for <math>Re_k</math>. <math>Re_3</math> values are consistently higher than <math>Re_k</math> values.</p>
2	400	5	<p>Graph 2: Plot of Reynolds number (<math>Re</math>) vs mass concentration (<math>\mu</math>, кг/кг) for experiment 2. The y-axis ranges from 0 to 6000, and the x-axis from 0 to 0,4. Blue dots represent <math>Re_3</math> and red dots represent <math>Re_k</math>. A black line shows a power-law fit for <math>Re_k</math>. <math>Re_3</math> values are consistently higher than <math>Re_k</math> values.</p>
3	400	10	<p>Graph 3: Plot of Reynolds number (<math>Re</math>) vs mass concentration (<math>\mu</math>, кг/кг) for experiment 3. The y-axis ranges from 0 to 10000, and the x-axis from 0 to 1,4. Blue dots represent <math>Re_3</math> and red dots represent <math>Re_k</math>. A black line shows a power-law fit for <math>Re_k</math>. <math>Re_3</math> values are consistently higher than <math>Re_k</math> values.</p>

Продолжение таблицы 2.8



Результаты исследований скорости витания твердых частиц в турбулентном восходящем потоке показывают, что с увеличением количества частиц в совокупности (группе) скорость витания этой совокупности (группы) снижается. Для оценки взаимного влияния частиц на скорость витания совокупности (группы) частиц рассматриваются результаты, полученные в работе [47] при исследовании явления стесненности при осаждении группы частиц.

При наличии в воздуховоде некоторой совокупности твердых частиц возникает явление стесненности [47], обусловленное вязким взаимодействием частиц друг с другом. Наиболее близкой с физической точки зрения к изучаемому процессу является модель хаотической суспензии. Для этого случая получено эмпирическое выражение, связывающее скорость осаждения группы частиц  $w$  со стоксовой скоростью осаждения одиночной частицы  $w_{\text{ч}}$  [47]:

$$\frac{w}{w_{\text{ч}}} = \frac{1}{1 + 1,3 \cdot \mu'^{1/3}} \quad (2.16)$$

Некоторые исследователи связывают скорость осаждения в двухфазной системе не с объемной долей частиц, а с величиной порозности (доля не занятого твердыми частицами исследуемого объема). Однако, это, скорее всего, характерно для процессов осаждения частиц в пылеуловителях.

На основе обобщения эмпирического закона фильтрации Дарси находят выражение для силы сопротивления, испытываемой частицей в облаке монодисперсных частиц:

$$F_c = 3\pi\eta d w_{\text{ч}} \lambda,$$

где  $\lambda$  – коэффициент, отражающий взаимные влияния частиц, зависит [47] от объемной концентрации частиц:

$$\lambda = \frac{4 + 3 \cdot \mu' + 3 \cdot (8 \cdot \mu' - 3 \cdot \mu'^2)^{1/2}}{(2 - 3 \cdot \mu')^2}, \quad (2.17)$$

где  $\mu'$  – объемная концентрация, м<sup>3</sup>/ м<sup>3</sup>.

Как показывают результаты исследований, выполненных специалистами Немецкой компании "Neuero Farm- und Fördertechnik GmbH", которая специализируется на производстве мобильных пневматических конвейеров для транспортировки сыпучих гранулированных материалов посредством пневмотранспорта, увеличение количества частиц в совокупности (группе) оказывает влияние на снижение скорости витания этой совокупности (группы)

в силу затухания пульсаций скорости движения потока при его взаимодействии с твердыми частицами [132]. Кроме того, тесты, выполненные в "Neuero Farm- und Fördertechnik GmbH" показывают, что в действительности частицы, как правило, перемещаются порциями или «облаками» и перемещаются несколько быстрее, чем больше частиц в группе. Специалисты фирмы считают, что в этом случае есть аналогия с эффектом плоскости, защищенной от ветра.

Использование выражения (2.16) для оценки взаимного влияния частиц (коэффициента  $\lambda$ ), размеров воздуховода и частицы, массовой и объемной концентрации на отношение скорости витания группы частиц  $w_{\text{вит.гр}}$  к скорости витания одиночной частицы  $w_{\text{вит.ч}}$  позволило получить следующее отношение:

$$\frac{w_{\text{вит.гр}}}{w_{\text{вит.ч}}} = \frac{0,75 \cdot \lambda^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_{\text{ч}}}\right)^{0,2}}{(1 + \mu)^{0,25}}. \quad (2.18)$$

Результаты экспериментальных исследований и обработки по формуле (2.18), позволяющие оценить влияние стесненности, представлены на рисунке 2.13.

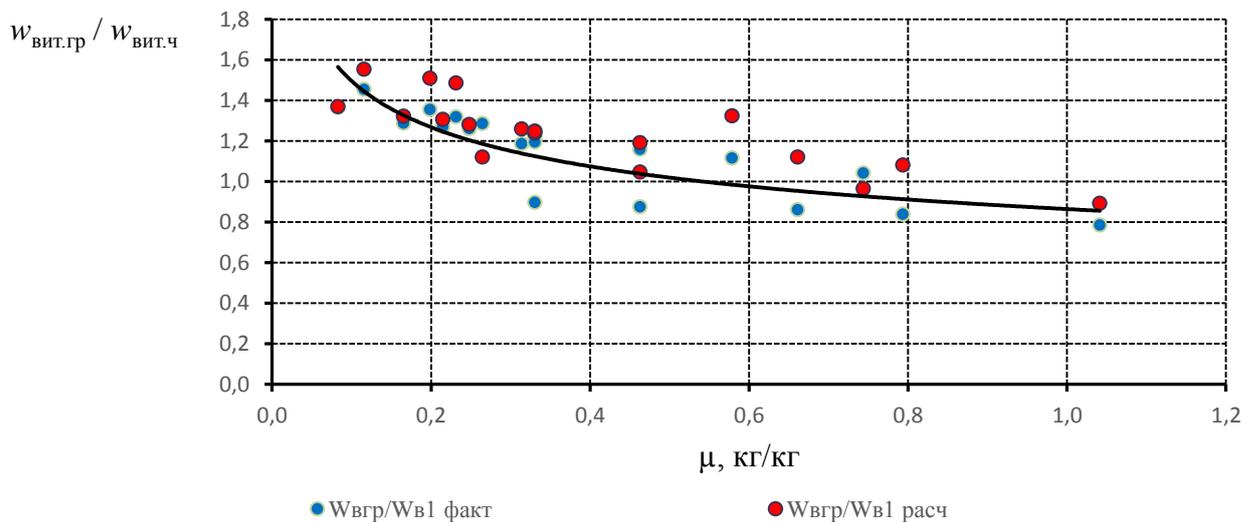


Рисунок 2.13 – Влияние стесненности пылевоздушного потока на скорость витания группы частиц

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.

## **2.5 Экспериментальные исследования движения пылевоздушного потока в наклонном воздуховоде**

Для экспериментальных исследований движения пылевоздушного потока по наклонному воздуховоду использована опытная установка (рисунок 2.4), в схему которой внесены следующие изменения (рисунок 2.14):

- воздуховод переменного сечения был заменен на воздуховод постоянного сечения;
- для изменения угла наклона воздуховода от вертикального до горизонтального с шагом  $15^\circ$  использовано координатное устройство.



Рисунок 2.14 – Экспериментальная установка

Для закрепления установки в определенном положении предусмотрено фиксирующее устройство, состоящее из жестко закрепленной на стойке тяги (цепи). Цепь надевается на крюк, жестко закрепленный на металлической конструкции в лаборатории. Угол наклона устанавливается с помощью лабораторного транспортира, жестко закрепленного на станине.

Ниже приведена последовательность проведения измерений скорости транспортирования твердых частиц:

1. Устанавливался угол наклона опытной установки (рисунок 2.15) –  $0^\circ$ ;  $15^\circ$ ;  $30^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $60^\circ$ ;  $75^\circ$ ;  $90^\circ$ .
2. Включался вентилятор, создающий разрежение на входе в коллектор.
3. В лоток помещалось определенное количество исследуемых частиц.
4. Визуально определялось начало движения частиц.

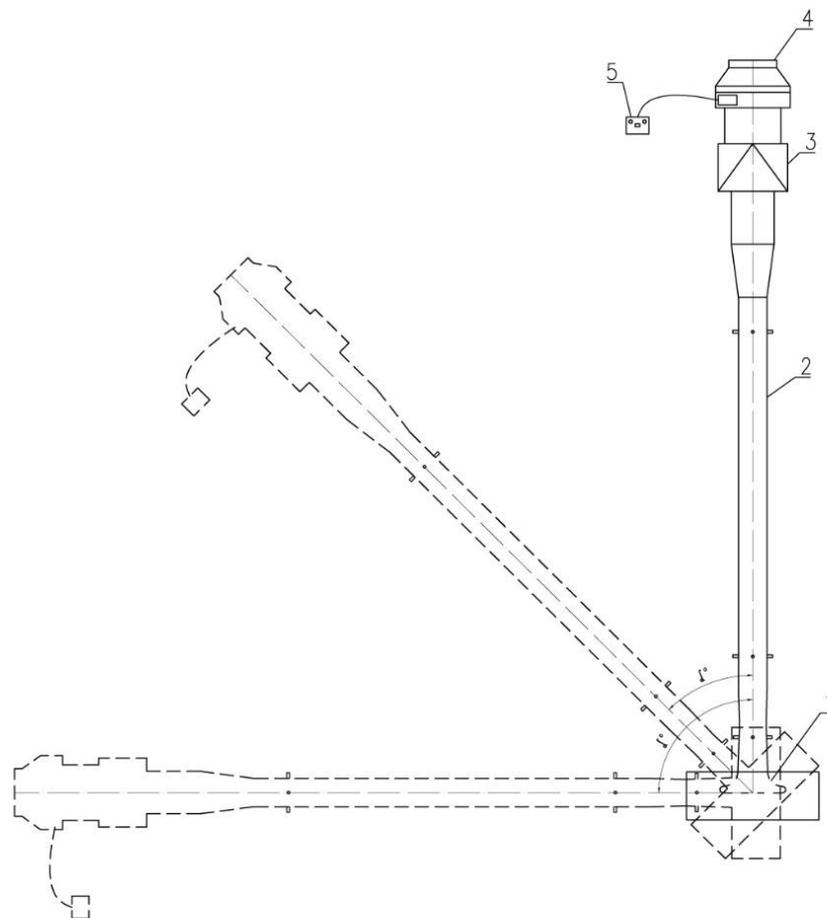


Рисунок 2.15 – Схема экспериментальной установки для определения скорости транспортирования: 1 – коллектор входной, 2 – прозрачный воздуховод постоянного сечения, 3 – фильтр, 4 – вентилятор; 5 – лабораторный автотрансформатор

5. Проводились измерения давлений в сечениях 1–1 и 2–2 по показаниям микроманометров и определялись скорости движения воздуха.

Исследования проводились с теми же материалами, которые исследовались в разделе 2.2.

Обработка результатов представлена в таблицах 2.9 – 2.10.

В таблице 2.9 и на рисунке 2.16 представлены результаты обработки скорости транспортирования в наклонном воздуховоде по отношению к скорости витания. Принята скорость витания 9,9 м/с из таблицы 2.1.

Экспериментальные данные изменения скорости транспортирования по отношению к скорости витания в зависимости от угла наклона трубопровода представлены на рисунке 2.17.

Таблица 2.9 – Скорости транспортирования

№ п/п	Угол наклона трубы	Скорость транспортирования, $w_T$ , м/с	Среднее значение, $w_{ср}$ , м/с	$\frac{w_T}{w_{ВИТ}}$
1	0	17,4	15,9	1,6
2		14,8		
3		15,6		
1	15	17,3	16,9	1,7
2		15,6		
3		17,8		
1	30	16,9	17,9	1,8
2		19,3		
3		17,6		
1	45	18,1	18,4	1,85
2		17,9		
3		19,2		
1	60	17,9	17,5	1,76
2		18,7		
3		15,9		
1	75	15,9	16,5	1,66
2		17,0		
3		16,6		
1	90	16,2	15,4	1,55
2		15,5		
3		14,8		

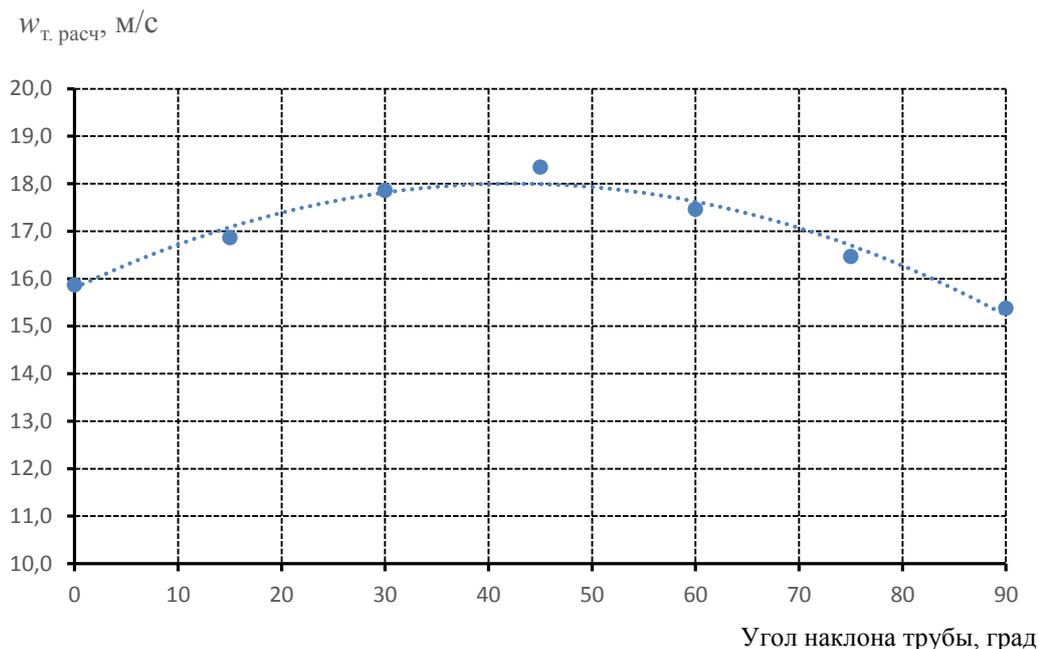


Рисунок 2.16 – Скорость транспортирования в зависимости от угла наклона трубопровода

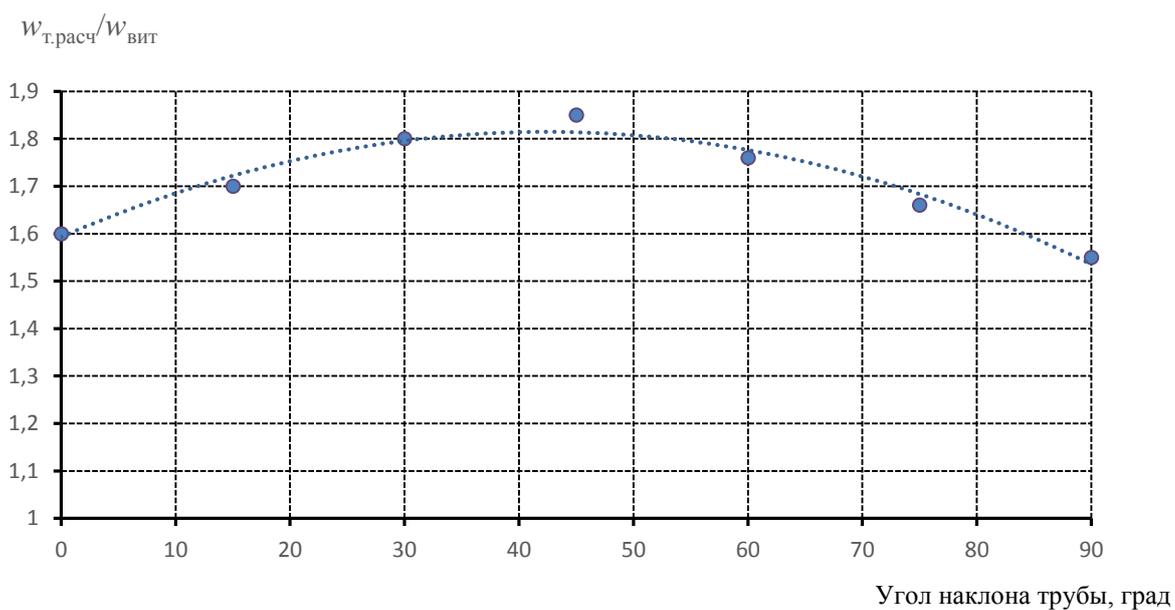


Рисунок 2.17 – Отношение скорости транспортирования к скорости витания в зависимости от угла наклона трубопровода

Подобный характер распределения скорости транспортирования в зависимости от угла наклона (формула 1.13) описан в работах [42, 44, 62].

В таблице 2.10 и на рисунке 2.18 представлены результаты обработки потерь давления при различных углах наклона в воздуховодах относительно горизонтального.

Обобщенные результаты, представленные в таблице 2.11, использованы при разработке программы расчетов систем вакуумной уборки.

Если определить критерий Рейнольдса по экспериментальному значению скорости витания частицы  $Re_{\text{вит}} = \frac{w_{\text{вит}} \cdot d}{\nu}$ , то зависимость для

критерия Фруда, найденного по скорости транспортирования  $Fr_T = \frac{w_T^2}{g \cdot d_{\text{ч}}}$ ,

может быть описана следующей зависимостью:

$$Fr_k = Re_{\text{вит}}^{0,89} (1 + \sin 2\alpha)^{0,5}. \quad (2.19)$$

Таблица 2.10–Результаты экспериментальных исследований потерь давления в воздуховодах

№ п/п	Угол наклона трубы	Потери давления в воздуховоде, $\Delta P$ , Па	Среднее значение, $P_{\text{ср}}$ , Па	$\frac{\Delta P_{\alpha}}{\Delta P_{\text{гор}}}$
1	0	50,03	50,0	1,00
2		47,15		
3		52,82		
1	15	61,8	74,55	1,13
2		70,63		
3		91,23		
1	30	71,4	71,2	1,27
2		73,9		
3		68,3		
1	45	70,9	70,63	1,34
2		67,5		
3		73,5		
1	60	65,5	64,74	1,25
2		61,9		
3		66,8		
1	75	64,75	67,20	1,16
2		63,27		
3		73,57		
1	90	60,80	61,80	1,10
2		59,5		
3		65,1		

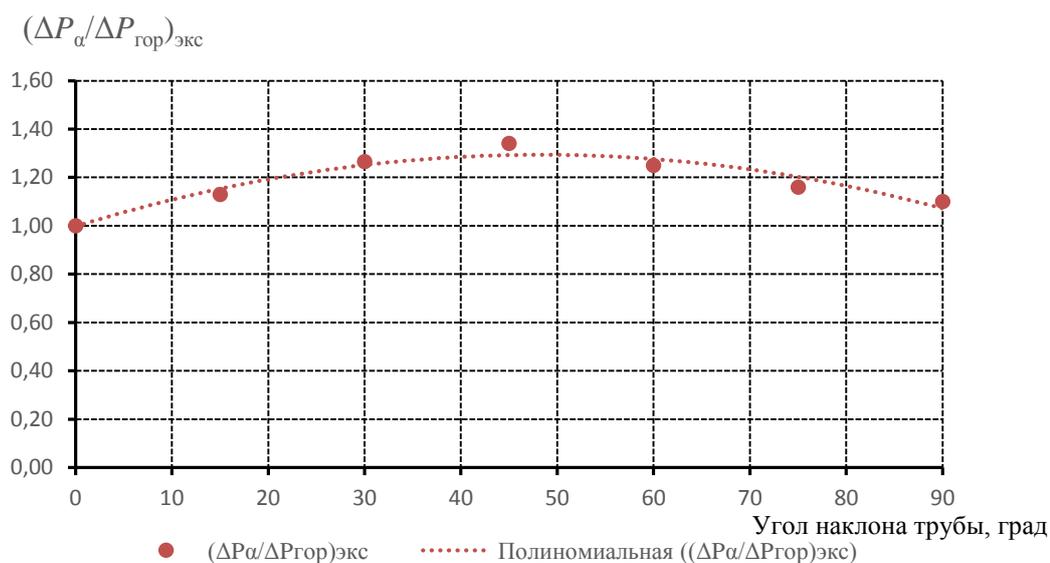


Рисунок 2.18 – Отношение потери давления в наклонном к потерям давления горизонтальном воздуховоде в зависимости от угла наклона

Таблица 2.11 – Сводная таблица результатов исследования

№ п/п	Угол наклона трубы, $\alpha$ , град	$\frac{w_T}{w_{вит}}$	$\frac{\Delta P_{\alpha}}{\Delta P_{гор}}$
1	0	1,6	1,00
2	15	1,7	1,13
3	30	1,8	1,27
4	45	1,85	1,34
5	60	1,76	1,25
6	75	1,66	1,16
7	90	1,55	1,10

На рисунке 2.19 приведены результаты экспериментальных исследований критерия Фруда  $F_{гэ}$  и расчетные значения  $F_{гк}$  по формуле (2.19) при постоянном числе Рейнольдса, определенном по скорости витания. Установлено соответствие экспериментальных и расчетных значений критерия Фруда.

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.

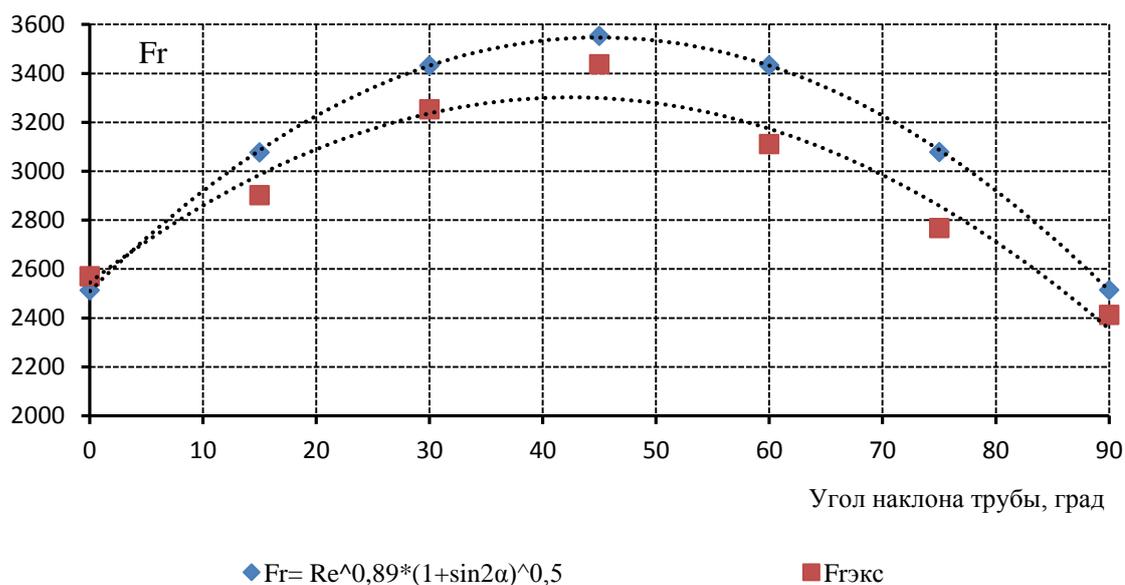


Рисунок 2.19 – Соотношение экспериментальных и расчетных значений критерия Фруда в зависимости от угла наклона трубопровода

## 2.6 Выводы по главе 2

На основе выполненных экспериментальных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. В результате анализа известных экспериментальных установок выявлены основные требования для разработки схемы опытной установки для исследования скорости витания твердых частиц.
2. Доказано соответствие результатов исследований скоростей витания одиночных шарообразных частиц эмпирическим данным других авторов.
3. На основе результатов полного трехфакторного эксперимента получено уравнение регрессии, учитывающее влияние размера частиц, плотности материала и массовой концентрации на величину скорости витания совокупности (группы) частиц.
4. В результате обработки экспериментальных значений скорости витания совокупности (группы) частиц получено критериальное уравнение вида  $Re_k = f(Ar, \mu)$ , которое может быть использовано в расчетах систем пневмотранспорта и аспирации.

5. Исследования аэродинамики в наклонном воздуховоде позволили получить скорости транспортирования и потери давления для двухфазных потоков при углах наклона  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  и зависимости скорости транспортирования в наклонном и горизонтальном воздуховодах.

6. На основании экспериментальных исследований транспортирования частиц получено критериальное уравнение вида  $Fr_k = f(Re_{\text{вит}}, \alpha)$ .

## **ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ВОЗДУХОВОДЕ**

Несмотря на решение ряда задач по снижению запыленности воздуха в рабочей зоне предприятий по переработке сыпучих материалов [3, 7, 14, 47, 50, 62, 80], многие теоретические вопросы этой проблемы еще недостаточно исследованы. Имеющиеся экспериментальные данные о гидродинамике двухфазного потока носят противоречивый характер,

Часто отсутствие исходных данных не позволяет проектировать эти системы в соответствии с особенностями технологических процессов. Сложность физических явлений, протекающих при перемещении материала по воздуховоду, связана помимо наличия примесей (твердых частиц) с турбулентностью воздушных потоков и особенностью течения в пристеночной области воздуховода, которые сами по себе еще мало изучены [37]. В работе [13] представлены результаты математического моделирования движения двухфазного потока мелкодисперсных материалов с использованием программного комплекса Ansys Fluent для оценки энергоэффективности пневмокамерных насосов технологических систем пневмотранспорта. В настоящее время разработан ряд прикладных гидродинамических комплексов, например, STAR-CCM+, использование которых позволяет провести численное моделирование различных физических процессов. Исходя из выше изложенного, была предпринята попытка использовать широко распространенный в современных исследованиях численный эксперимент [83].

### **3.1 Построение модели обтекания твердых частиц потоком воздуха**

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.

Двухфазные турбулентные потоки, состоящие из смеси газа с твердыми частицами, применяются в различных областях техники. К ним относятся топливные факелы в камерах сгорания твердого топлива, двухфазные струи пескоструйных аппаратов, пылевоздушные потоки аспирационных систем и т.д. Теоретически наиболее изучены двухфазные струи [1, 9, 64, 77, 112], не имеющие твердых границ. Если ранее примесь рассматривалась как пассивная, влияющая на характеристики струи только через изменение ее плотности, то в последние годы получены результаты, указывающие на активное влияние примеси на турбулентную структуру струи.

Как известно, экспериментальные исследования струй, несущих твердые частицы, требует преодоления ряда трудностей, связанных, в первую очередь, с получением монодисперсной примеси и созданием равномерного распределения примеси по сечению, а также с созданием достоверной методики определения скоростей фаз, концентрации частиц и других характеристик. Эти обстоятельства ограничивают использование физических экспериментов только для верификации численных экспериментов.

Первые попытки разработки теории двухфазных струй были выполнены в рамках простейшей модели турбулентности – теории пути смешения Прандтля. Последующие теоретические исследования основаны на численном интегрировании уравнений с частными производными.

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 и что всеми силами, действующими на частицу, кроме силы сопротивления, можно пренебречь:

$$dw'_r + \mu d'_q = 0, \quad (3.1)$$

$$m_{\text{ч}} \frac{dw_{\text{ч}}}{dt} = C \frac{\rho_{\text{г}} (w'_{\text{г}} - w'_{\text{ч}}) |w'_{\text{г}} - w'_{\text{ч}}|}{2} S_{\text{М}}, \quad (3.2)$$

где  $w'_{\text{г}}$  и  $w'_{\text{ч}}$  – пульсационные составляющие скорости газа и частиц;  $m_s$  – масса частицы;  $m = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}}}{6}$ ;  $S_{\text{М}}$  – площадь миделева сечения.

Коэффициент сопротивления определяется по формуле Стокса [59] или по другой полуэмпирической зависимости в более широком диапазоне чисел Рейнольдса. Результаты экспериментальных исследований [1] показывают, что частицы примеси в силу влияния лобового сопротивления способствуют существенному уменьшению пульсационных скоростей газа и касательных напряжений смеси. Учитывая преимущественное использование эмпирических формул для расчета систем пневмотранспорта, не отражающих в полной мере влияние плотности, размеров и массовой концентрации перемещаемых твердых частиц, предложена численная модель обтекания неподвижных твердых частиц потоком воздуха.

Таким образом, в качестве первого этапа численного исследования течения двухфазных потоков в данной работе был выполнен численный эксперимент для «статической» модели. Выполнено численное моделирование изотермического турбулентного воздушного потока, воздействующего на шарообразные частицы, расположенные в воздуховоде круглого сечения. Результаты расчета позволяют оценить влияние концентрации материала на давление, оказываемое на частицы при постоянной скорости воздушного потока.

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

Описание поведения воздушного потока:

уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}, \quad (3.3)$$

уравнение сохранения массы (неразрывности)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j) = 0, \quad (3.4)$$

Компоненты тензора напряжений  $\tau_{ij}$ , определены с помощью реологического закона Ньютона

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j}, \quad (3.5)$$

где  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ ,  $s_{ij}$  – компоненты тензора скоростей

деформаций, определяемые выражением  $s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $\overline{u'_i u'_j}$  – компо-

ненты тензора турбулентных напряжений.

Для замыкания системы уравнений необходимо определить шесть различных компонент симметричного тензора турбулентных напряжений  $\tau_{ij}$ . Большинство моделей турбулентности используют для этого гипотезу Буссинеска:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = 2\mu_t s_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}, \quad (3.6)$$

где  $k \equiv \frac{\overline{u'_i u'_i}}{2}$  – кинетическая энергия турбулентности.

Для нахождения характеристик турбулентности использована  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности Лаундера-Шарма [128]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon, \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3.8)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3,$$

генерационный член в уравнениях переноса (3.7) и (3.8)

$$P = \mu(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) \cdot \nabla \vec{V}, \quad (3.9)$$

где  $k$  — кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  — скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;  $\mu_t$  — турбулентная вязкость;  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$  — полуэмпирические коэффициенты модели турбулентности.

Приведенная формулировка  $k$ - $\varepsilon$  модели является высокорейнольдсовой. Поэтому для постановки граничных условий на стенке использовались так называемые пристеночные функции, базирующиеся на предположении, что профиль скорости в пристеночном турбулентном пограничном слое имеет линейный и логарифмический участки.

Данный подход моделирования турбулентности является в настоящее время наиболее широко используемым при решении практических задач [25 – 26, 28 – 30, 31 – 32] и позволяет получить трехмерные поля скорости и давления по объему воздуховода, трения и давления на твердые поверхности частиц. Анализ полей показывает сложную структуру взаимодействия потоков в воздуховоде при обтекании систем шарообразных частиц.

В расчетах использовалась  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности. Дискретизация исходных уравнений осуществлялась методом контрольного объема. Поля скорости и давления рассчитывались с помощью процедуры PISO [123, 126] в сочетании с многосеточным алгоритмом AMG [130].

В воздуховоде диаметром 0,075 м и длиной 1,5 м на расстоянии 0,5 м от входа расположены неподвижные частицы диаметром 0,005 м. Разработаны 14 вариантов моделей, в которых количество частиц варьируется от одной до 200, также меняется их взаимное расположение (модели представлены на рисунке 3.4 и в таблице 3.1). В численном эксперименте масса частиц не учитывалась.

Скорость воздуха на входной границе принята как разность между скоростью воздушного потока и скоростью частиц, на основе известных [17] и

экспериментальных исследований равна 5 м/с. Температура и плотность воздуха приняты постоянными. Для повышения точности расчета использовалась неструктурированная сетка с измельчением в области шарообразных частиц (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Расчетная сетка в объеме трубы

Вблизи стенок трубы и частиц сделаны призматические слои с соответствующим сгущением к поверхностям (рисунок 3.2).

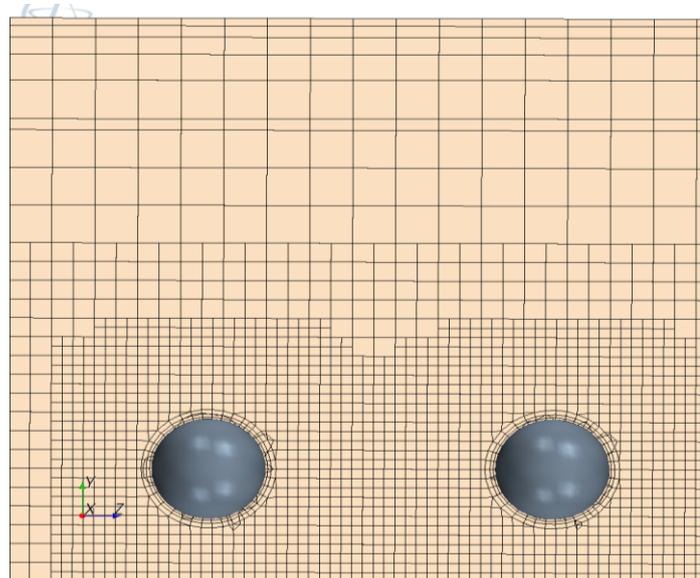


Рисунок 3.2 – Фрагменты расчетной сетки

Количество ячеек в расчетной сетке для различных задач находится в диапазоне от 531 тыс. ячеек для одной частицы, до 3,5 млн. ячеек для 200 частиц. Особое внимание уделено разрешению сеточной структуры и качеству

расчетной сетки. В области частиц выполнено сгущение расчетной сетки, кроме того на внутренних стенках воздуховода и поверхности частиц (рисунок 3.2) был построен призматический слой для описания пристеночных течений.

При проведении численного эксперимента выполнена оценка сходимости. Расчет считался законченным при достижении стационарности отслеживаемых параметров. На рисунке 3.3 представлен график сил, действующих на частицы, полученный в результате расчета для 42 частиц.

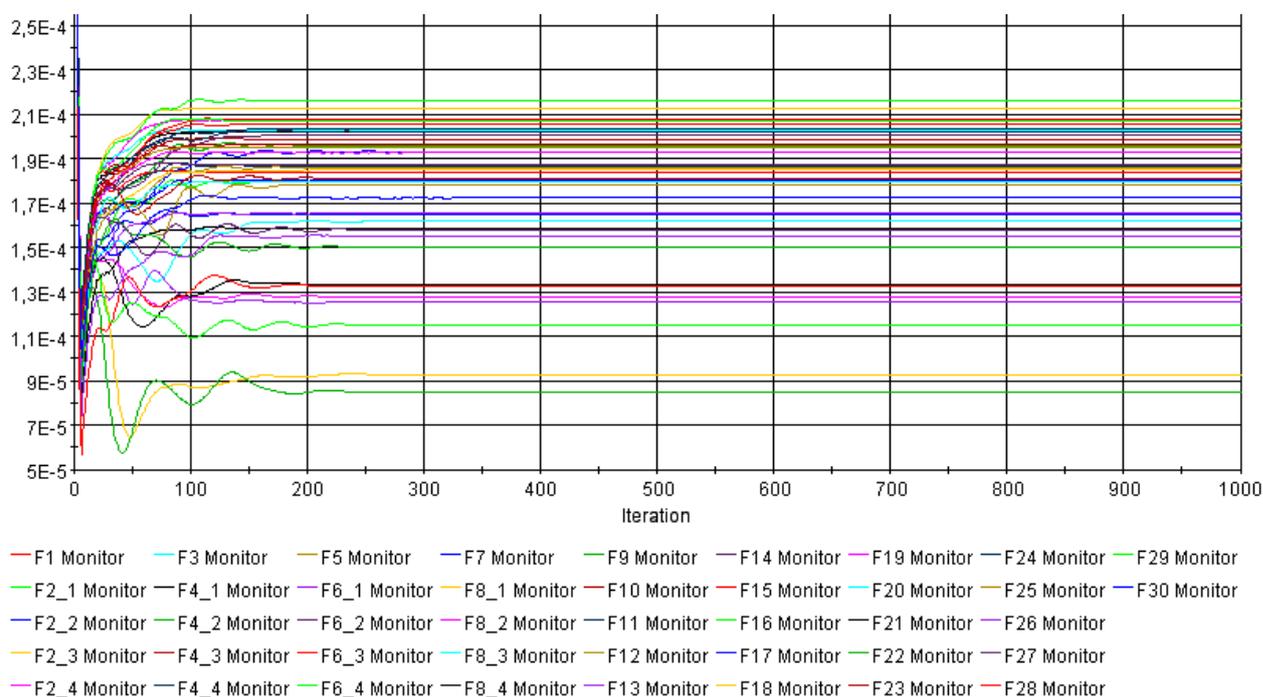
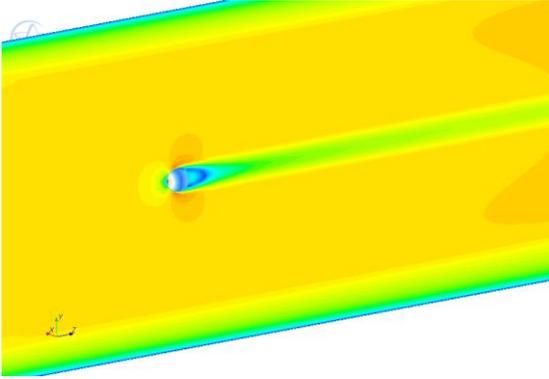


Рисунок 3.3 – График изменения сил, действующих на частицы в процессе расчета

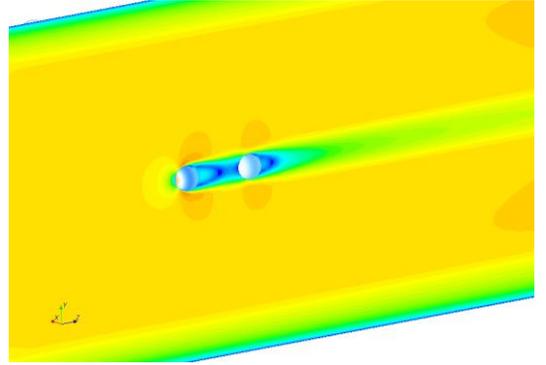
В результате расчетов получены поля скоростей и давления, формирующиеся в воздуховоде (рисунок 3.4). На рисунке 3.4 поля давлений представлены на шарообразных частицах, а поля скоростей – в пространстве между ними.

Частицы перекрывают свободное сечение трубопровода для прохода потока воздуха и чем выше концентрация частиц, тем больше перекрывается сечение трубопровода. Следовательно воздух в этом сечении трубопровода приобретает более высокую скорость, чем если бы он проходил по всему сечению.

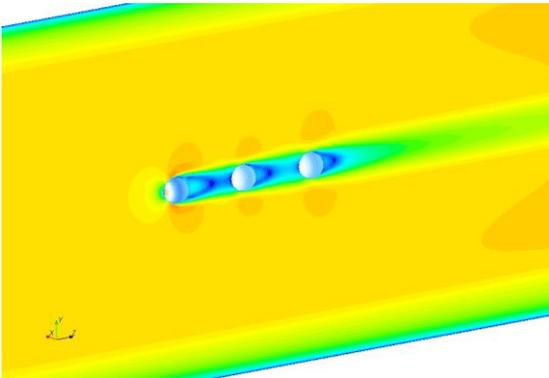
1



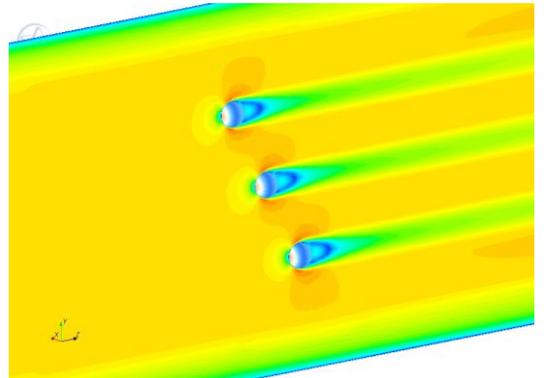
2



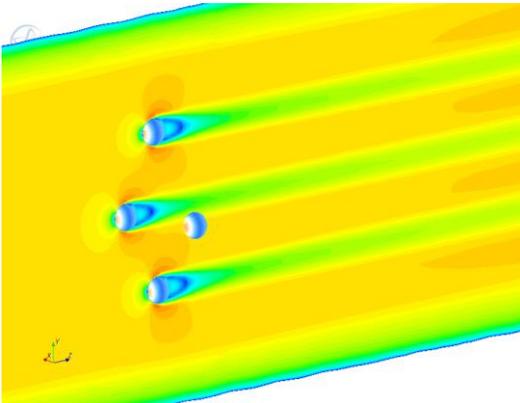
3



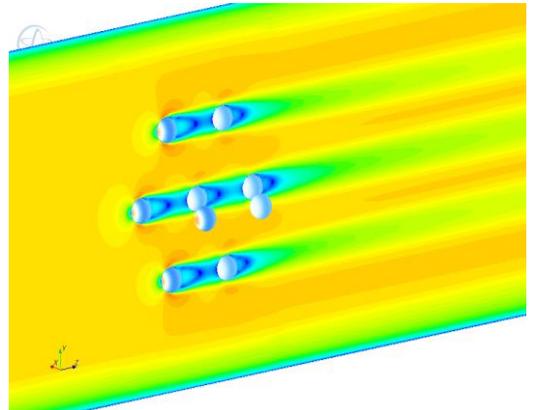
4



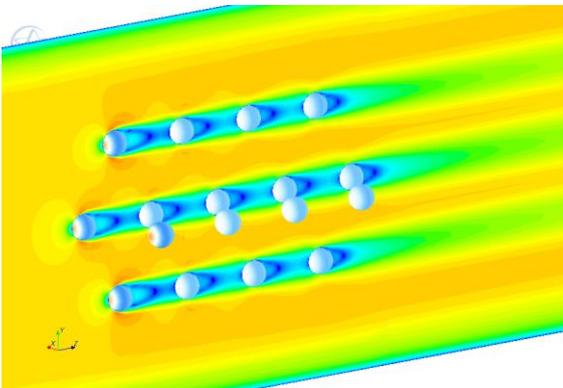
5



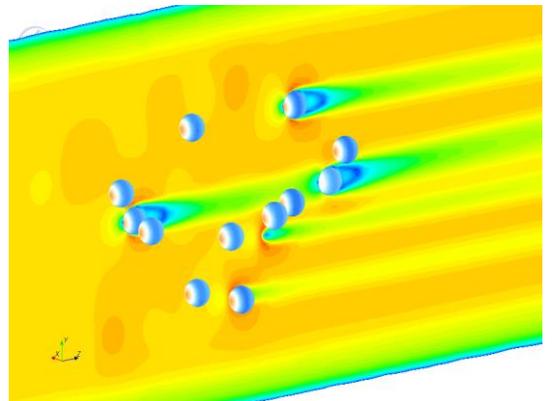
6



7



8



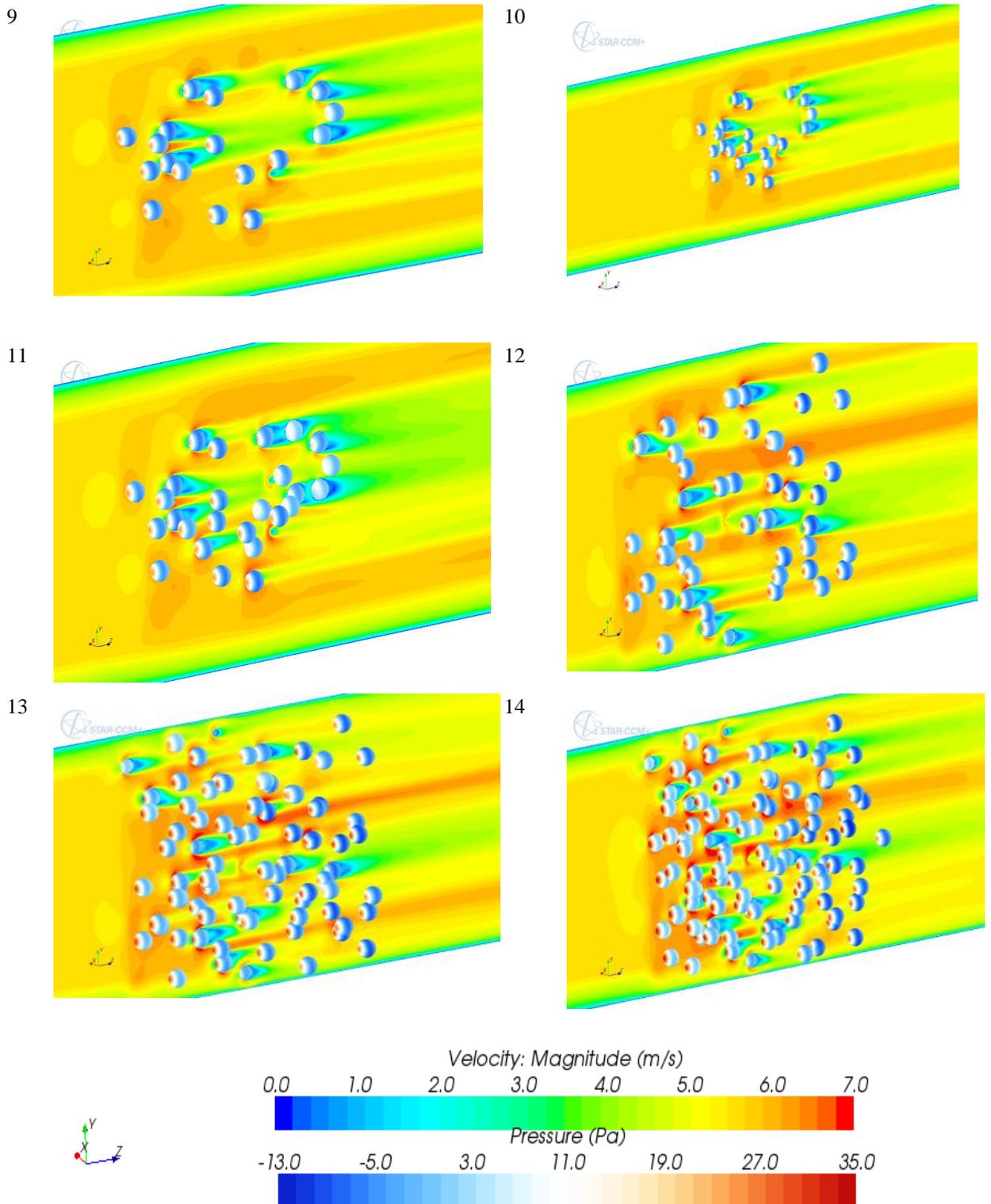


Рисунок 3.4 – Поля скоростей воздуха и давления на частицы

Оценка результатов исследования модели позволяет сделать вывод, что с ростом количества частиц, скорость воздуха в живом сечении увеличивается от 5 м/с до 7 м/с при неизменном расходе воздуха. Это позволило сделать

вывод, что транспортирование сыпучего материала с большими концентрациями возможно вести с меньшим расходом воздуха или с меньшими скоростями транспортирования воздуха. Давление на отдельную частицу также возрастает.

Получены суммарные силы давления на каждую частицу как интеграл давления по поверхности. Рассмотрим подробнее, какое давление оказывает воздух на частицы. Вводим понятие относительной силы давления

$$P_{\text{отн}} = \frac{P}{P_0},$$

где  $P$  – сила давления на частицу, Н;  $P_0$  – сила давления на одиночную частицу,  $P_0 = 1,816 \cdot 10^{-4}$  Н.

Используя понятие относительной силы давления, как отношение силы давления на частицу при их некотором количестве к силе давления на одиночную частицу, получены диапазон изменения относительной силы давления на частицу (таблица 3.1) [67].

Параллельное расположение частиц обуславливает существенное увеличение как минимальной, так и максимальной относительной силы давления по сравнению с последовательным размещением. При этом минимальная относительная сила давления на частицу становится соизмеримой с аналогичной силой давления при случайном размещении частиц. Что касается изменения максимальной относительной силы давления при случайном размещении частиц, то вследствие взаимного влияния частиц имеет место увеличение данной силы. Зависимость максимальной относительной силы давления от количества частиц при случайном их расположении в воздуховоде представлена на рисунке 3.5.

Полученные результаты использованы при определении силы давления на частицы для разработки численной динамической модели скорости витания твердых частиц, учитывающей силу тяжести частиц.

Таблица 3.1 – Сила давления воздушного потока на частицы

№ п/п модели	Количество шарообразных частиц	Расположение частиц в воздуховоде	Минимальная относительная сила давления на частицу	Максимальная относительная сила давления на частицу
1	1		1	1
2	2	последовательно	0,697	0,935
3	3	друг за другом последовательно	0,644	0,930
4	3	в ряд параллельно	1,014	1,019
5	5	параллельно-последовательно	1,019	1,037
6	11	То же	0,663	0,970
7	21	То же	0,584	0,963
8	21	хаотичное	0,791	1,058
9	28	хаотичное	0,801	1,161
10	35	хаотичное	0,849	1,180
11	42	хаотичное	0,691	1,191
12	100	хаотичное	0,820	1,282
13	150	хаотичное	0,909	1,390
14	200	хаотичное	0,945	1,531

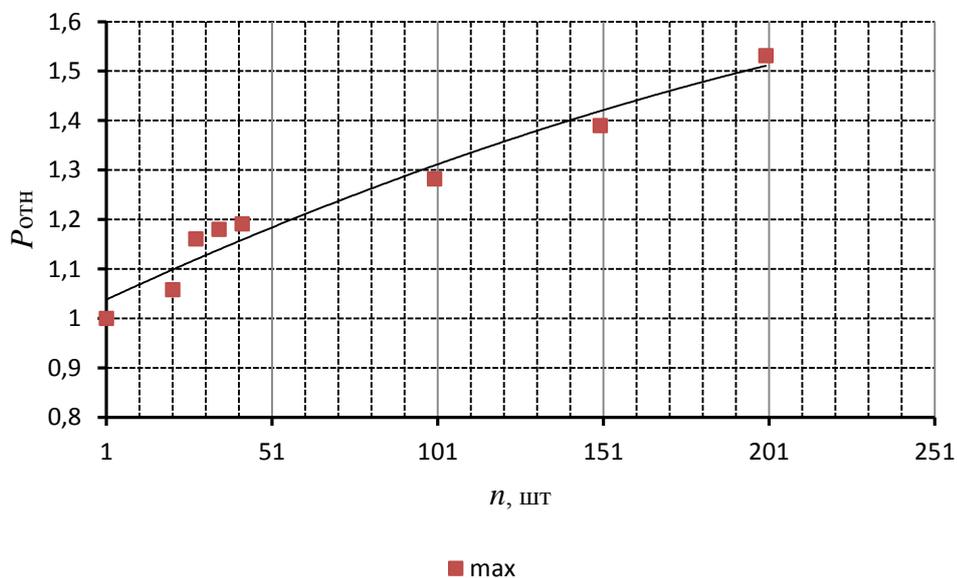


Рисунок 3.5 – Изменение максимальной относительной силы давления на частицу в зависимости от количества хаотично расположенных частиц

### 3.2 Численное моделирование скорости витания

Как было выявлено выше, наличие примеси существенно влияет и на турбулентную структуру течения смеси.

В работах по аэродинамике струйных течений с примесью, в частности, [1] отмечено, если поток направлен вертикально вверх, то в этом случае сила тяжести, воздействующая на частицу, снижает положительные составляющие пульсации продольной скорости примеси и увеличивает по модулю отрицательные составляющие. Наоборот положительные составляющие пульсации продольной скорости газа увеличиваются, а отрицательные составляющие по модулю уменьшаются. Учитывая, что на поперечные составляющие пульсационной скорости газа и примеси сила тяжести не оказывает существенного влияния, то в смеси появляется асимметрия абсолютных значений пульсационных составляющих продольных скоростей газа и примеси.

Если поток направлен горизонтально, то влияние силы тяжести испытывают поперечные составляющие пульсационной скорости газа и примеси. В случае наклонного течения влияние силы тяжести испытывают обе составляющие пульсационной скорости газа и примеси.

В общем случае уравнение движения частицы в газовом потоке с учетом силы тяжести может быть записано в следующем виде [1]:

$$m_{\text{ч}} \frac{du_{\text{гi}}^{\pm} - u_{\text{гi}}^{\pm}}{dt} = c \frac{\rho_{\text{г}} (u_{\text{гi}}^{\pm} - u_{\text{чи}}^{\pm}) |u_{\text{гi}}^{\pm} - u_{\text{чи}}^{\pm}| \pi d_{\text{ч}}^2}{2 \cdot 4} - g_i, \quad (3.10)$$

где  $u_{\text{гi}}^{\pm}$  и  $u_{\text{чи}}^{\pm}$  – положительные и отрицательные пульсационные составляющие скорости газа и частиц, состоящие из продольных и поперечных составляющих;  $g_i$  – составляющие ускорения силы тяжести, действующей на частицу в направлении движения потока ( $g_i = g \cdot \sin \alpha$ ) и в перпендикулярном направлении движения потока ( $g_i = g \cdot \cos \alpha$ );  $\alpha$  – угол наклона потока к поверхности земли.

Очевидно, что влияние веса частиц на значение пульсационной скорости газа будет значительно тогда, когда составляющая скорости витания частиц соизмерима с соответствующей составляющей пульсационной скорости газа. Проекции скорости витания на ось потока и на перпендикулярное направление определяются из условия:

$$c \frac{\rho_g w_{\text{вита}}^2}{2} \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} = \frac{4}{3} \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{8} \rho_i g_i. \quad (3.11)$$

Для нахождения скорости витания в потоках с различными граничными условиями авторами использованы закон Стокса, критериальные зависимости с применением чисел Фруда и Рейнольдса и некоторые другие полуэмпирические методы [59]. Анализ результатов позволил сделать следующие выводы:

- уменьшение размера и увеличение концентрации частиц приводит к увеличению воздействия частиц на турбулентную структуру течения;
- наличие неравновесного течения приводит к уменьшению пульсационной составляющей скорости газа.

Поскольку примесь влияет на турбулентную структуру течения, то в запыленном потоке необходимо рассмотреть вопрос о диффузии твердой примеси в турбулентном потоке. В работе [125] полуэмпирическим путем определен критерий Шмидта с учетом модели турбулентности  $k$ - $\epsilon$ , однако метод может быть использован только для малых концентраций пыли, когда примесь можно считать пассивной. При больших концентрациях примеси достоверные данные могут быть получены только в результате численного моделирования течения в двухфазном потоке.

Для расчета скорости витания твердых шарообразных частиц в вертикальном воздуховоде использована система трехмерных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds Averaged Navier-Stokes или RANS), (3.3–3.9), с применением дискретного метода, основанного на подходе Лагранжа (3.12–3.23). 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:

$$m_p \frac{dw_p}{dt} = F_s + F_b, \quad (3.12)$$

где  $F_s$  – силы, действующие на поверхность частицы,  $F_b$  – массовые силы, действующие на частицу. Эти силы, в свою очередь разбиваются на:

$$F_s = F_d + F_p, \quad (3.13)$$

$$F_b = F_g + F_c, \quad (3.14)$$

где  $F_d$  – сила сопротивления,  $F_p$  – сила давления,  $F_g = m_p g$  – сила тяжести,  $F_c$  – дополнительные силы тела, представляющие взаимодействие частиц с другими частицами (*n.p.*) и с границами области (*n.b.*). При этом  $F_c$  представляется в виде:

$$F_c = \sum_{n.p.} F_c + \sum_{n.b.} F_c.$$

Помимо уравнения сохранения импульса (3.12), метод дискретных элементов включает уравнение для вычисления поворота частиц:

$$\frac{d}{dt} L_p = \frac{d}{dt} (I_p \omega_p) = \sum_{n.p.} T_c + \sum_{n.b.} T_c, \quad (3.15)$$

где крутящий момент вычисляется по формуле:

$$T_c = r_c \times F_c - \mu_r |r_c| |F_c| \frac{\omega_p}{|\omega_p|}, \quad (3.16)$$

где  $L_p$  – угловой момент частицы,  $I_p$  – момент инерции частицы,  $T_c$  – крутя-

щий 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;  $\mu_r$  – коэффициент трения качения;  $\omega_p$  – угловая скорость вращения частицы.

Коэффициент трения качения  $\mu_r$  был подобран в процессе верификации с опытной моделью и задан равным 0,3. Силы в (3.13), (3.14) моделируются следующим образом.

Уравнение для силы сопротивления  $F_d$  :

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_p |v_s| v_s, \quad (3.17)$$

где  $C_d$  – коэффициент сопротивления частицы,  $\rho$  – плотность воздуха,  $v_s$  – скорость скольжения частицы и  $A_p$  – площадь проекции частицы.

Уравнение для силы давления  $F_p$

$$F_p = -V_p \nabla p_{static}, \quad (3.18)$$

где  $V_p$  – объем частицы,  $\nabla p_{static}$  – градиент статического давления основной фазы.

Для описания силы взаимодействия между частицами  $F_{contact}$  использована модель взаимодействия Герца-Миндлин, которая основана на теории взаимодействия Герца-Миндлин [124, 127].

В рамках данной модели, силы, действующие между двумя сферами А и В, описываются следующим набором уравнений.

$$F_{contact} = F_n + F_t, \quad (3.19)$$

где  $F_n$  – нормальная и  $F_t$  – тангенциальная составляющие силы.

Нормальная сила:  $F_n = -K_n d_n - N_n v_n$ , где  $K_n = \frac{3}{4} E_{eq} \sqrt{d_n R_{eq}}$  – нормальная жесткость пружины,  $N_n = \sqrt{(5K_n M_{eq})} N_{ndamp}$  – нормальное демпфирование,  $N_{ndamp}$  – нормальный коэффициент затухания, определяемый из уравнения (3.22).

Тангенциальная сила определяется:

$$F_t = -K_t d_t - N_t v_t, \text{ если } |K_t d_t| < |K_n d_n| C_{fs}, \quad (3.20)$$

$$F_t = \frac{|K_n d_n| C_{fs} d_t}{|d_t|}, \text{ если } |K_t d_t| \geq |K_n d_n| C_{fs}, \quad (3.21)$$

где  $C_{fs}$  – статический коэффициент трения, тангенциальная жесткость пружины  $K_t = 8G_{eq} \sqrt{d_n R_{eq}}$ , тангенциальное демпфирование:  $N_t = \sqrt{5K_t M_{eq}} N_{tdamp}$ ,  $N_{tdamp}$  – тангенциальный коэффициент затухания, определяемый из уравнения (3.23)

$$N_{ndamp} = \frac{-\ln(C_{nrest})}{\sqrt{\pi^2 + \ln(C_{nrest})^2}}, \quad (3.22)$$

$$N_{tdamp} = \frac{-\ln(C_{trest})}{\sqrt{\pi^2 + \ln(C_{trest})^2}}, \quad (3.23)$$

здесь  $C_{nrest}$  и  $C_{trest}$  – нормальный и касательный коэффициенты упругости.

$R_{eq}$ ,  $M_{eq}$ ,  $E_{eq}$ ,  $G_{eq}$  – эквивалентные радиус частиц, масса частиц, модуль Юнга, модуль сдвига соответственно [124].

Численное моделирование скорости витания в экспериментальной установке с использованием программного комплекса Star-CCM+ включало следующие этапы [69]:

1. Подготовка модели и настройка граничных условий:
  - построение трехмерной модели установки (рисунок 3.6 а);
  - генерация расчетной сетки (рисунок 3.6 б);
  - задание граничных условий.
2. Решение задачи.
3. Просмотр результатов.

Создание трехмерной модели выполнено в программном комплексе Star-CCM+, так как имеет встроенные построители геометрии, которые пригодны для создания простых геометрических форм.

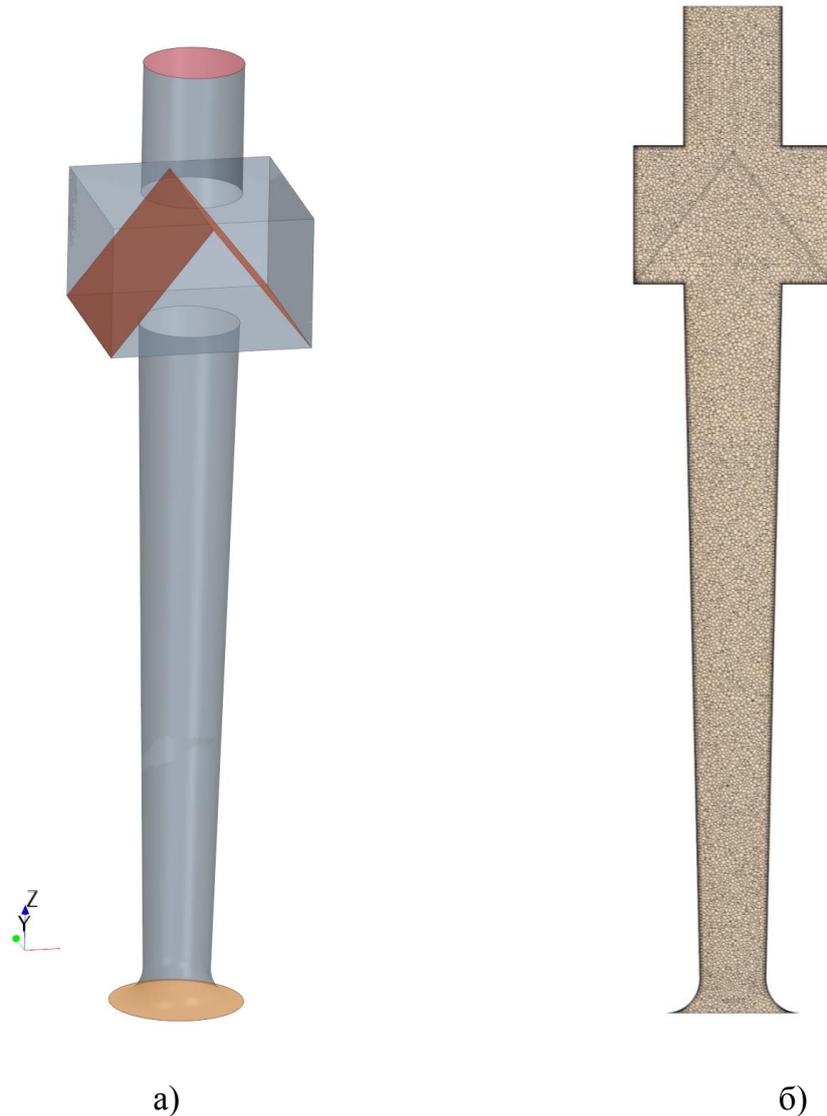


Рисунок 3.6 – Подготовка модели экспериментальной установки к численному моделированию процессов в экспериментальной установке  
а) трехмерная модель установки; б) генерация расчетной сетки

Генерация расчетной сетки представляет собой разбиение исходной расчетной области на большое количество элементов – расчетную сетку. Для повышения точности расчета использовалась сетка с многогранными ячейками (рисунок 3.6 б). Количество ячеек в расчетной сетке 600 тыс. Размеры элементов колебались от 0,5 мм у стенок до 5 мм в центральной области потока.

Вблизи стенок трубы сделаны призматические слои с соответствующим сгущением к поверхностям (рисунок 3.7). Затем выполнены генерация и проверка расчетной сетки на ошибки.

В качестве исходных данных приняты:

- физические параметры воздуха при нормальных условиях с постоянной плотностью;
- скорости на входе и выходе, соответствующие результатам экспериментальных исследований автора при различных количестве, размерах и плотности частиц шарообразной формы;
- количество частиц шарообразной формы с диаметрами 0,005 и 0,01 м;
- $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности;
- средняя интенсивность турбулентности на входе в расчетную область 1 %;
- условия взаимодействия частиц со стенками расчетной области и непосредственно между ними.

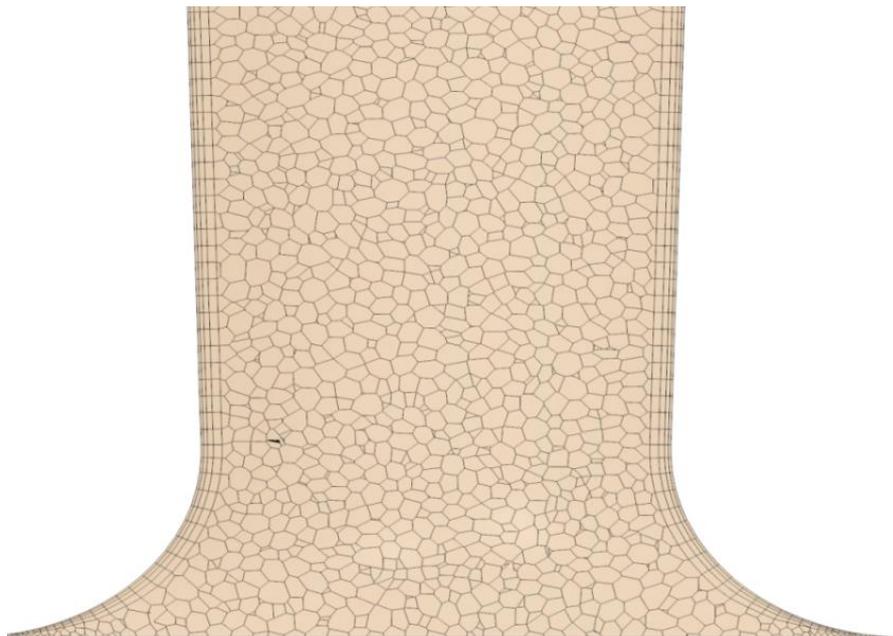


Рисунок 3.7 – Фрагмент расчетной сетки лемнискаты

Расчет выполнен в нестационарном режиме с шагом расчета по времени 0,005 с, при этом он считался законченным после нескольких полных циклов перемещений частиц вниз – вверх – вниз по области витания, и размер этой области стабилизировался (что видно на рисунке 3.8), примерно через 60 сек программного времени.

Расчет проводился на персональном компьютере со следующими характеристиками: процессор IntelCorei7 4790k, ОЗУ 64 Гб. Средняя продолжительность расчетов составляла 72 часа.

В результате расчета определены:

- поля скоростей в проточной части установки;
- области витания частиц.

Поля скоростей и области витания получены методом графической визуализации результатов расчетов в модуле постпроцессинга программы Star-CCM+. Численно область витания получена также методом программного слежения за каждой частицей, что видно на графике максимального и минимального положения частиц в области витания (рисунок 3.8)



Рисунок 3.8 – Область максимального и минимального положения частиц

Рассмотрим конкретный случай, при котором диаметр частиц составляет 0,005 м, плотность – 800 кг/м<sup>3</sup>. Скорость воздуха принята по данным экспериментальных исследований на опытной установке равной 11,38 м/с. В качестве граничных условий приняты следующие: температура воздуха 20 °С, размер воздуховода на входе 100 мм, на выходе 160 мм. Скорость воздуха на входе 22, 17 м/с, на выходе 10 м/с. Количество шариков, помещенных в трубу, 140 штук.

На рисунке 3.9.а в качестве примера для 140 частиц диаметром 0,005 м и плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> представлено распределение частиц в области витания, при этом для наглядности частицы, поднимающиеся вверх, выделены красным цветом, частицы, опускающиеся вниз – синим. Поля скоростей витания частиц и движения воздуха приведены на рисунке 3.9.б.

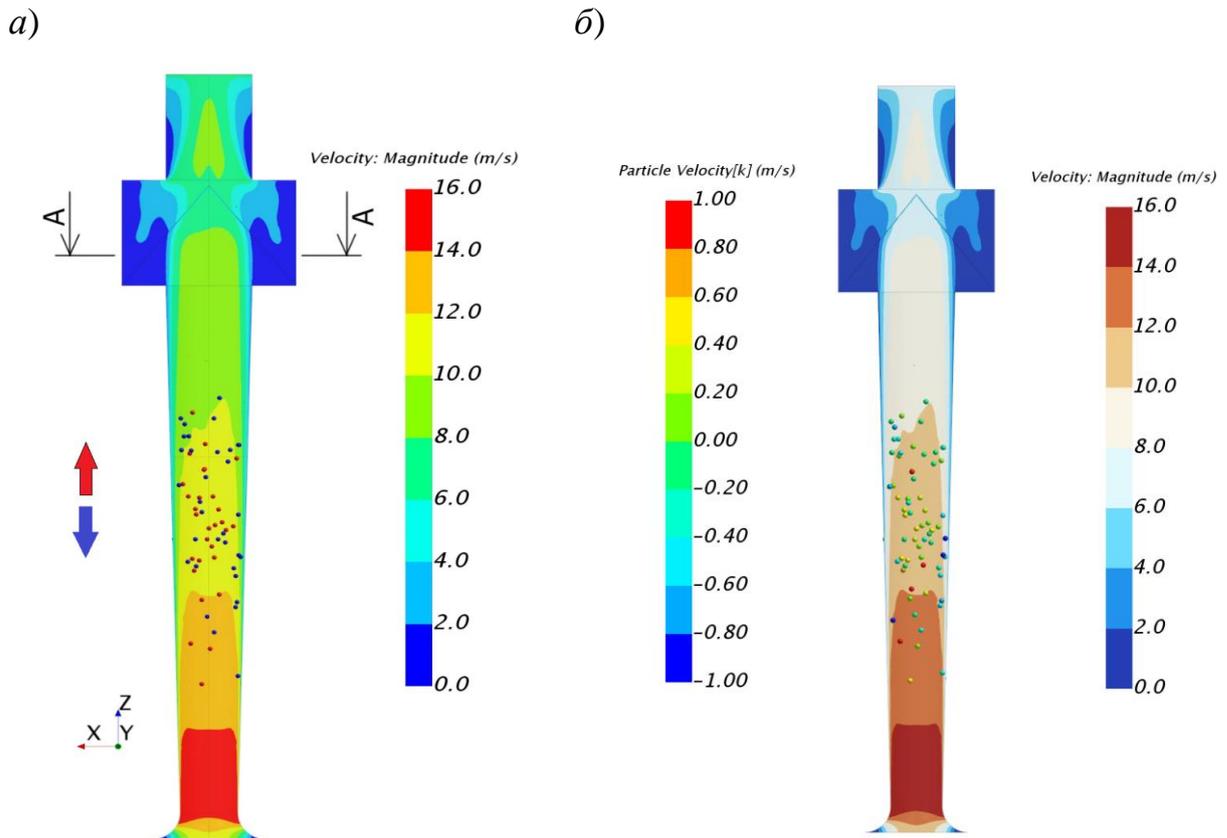


Рисунок 3.9 – Распределение частиц в области витания (а). Поля скоростей частиц и воздуха (б)

Получено удовлетворительное соответствие значений скорости витания: 11,38 м/с – по результатам физического эксперимента и 10,1 м/с – по данным численного эксперимента. Расхождение составляет 11 %.

В таблице 3.2 приведены средневзвешенные значения скоростей витания, полученные с использованием встроенной программы статистической обработки результатов.

На рисунке 3.10 показано поперечное сечение А-А, в котором видно распределение частиц внутри воздуховода.

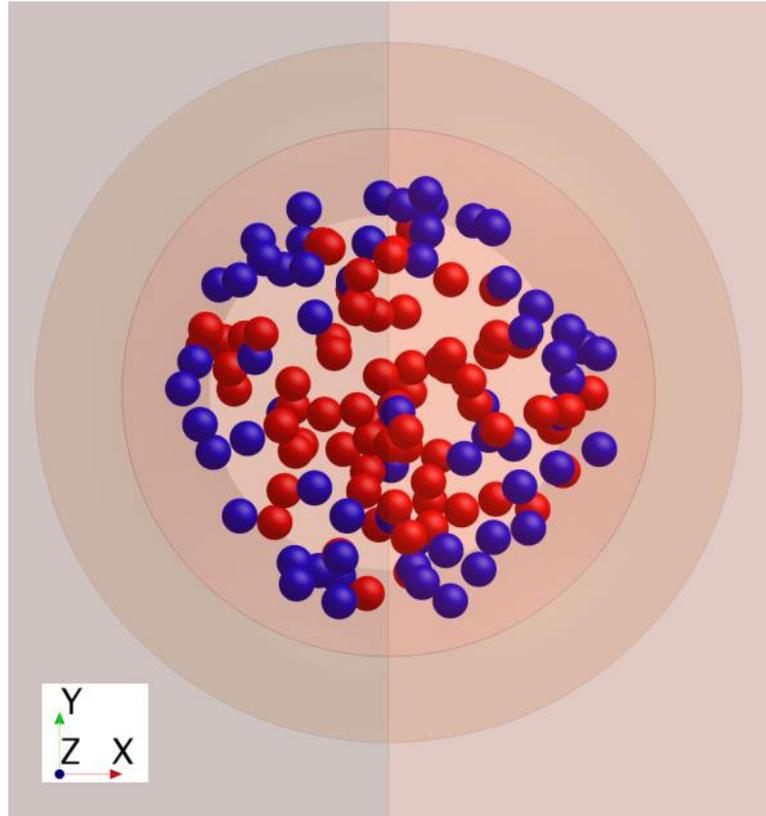
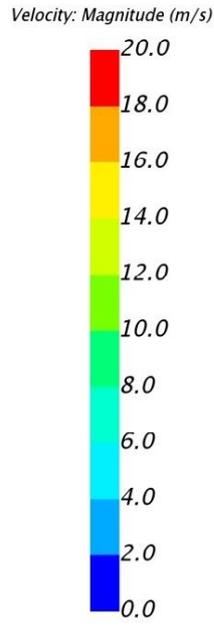
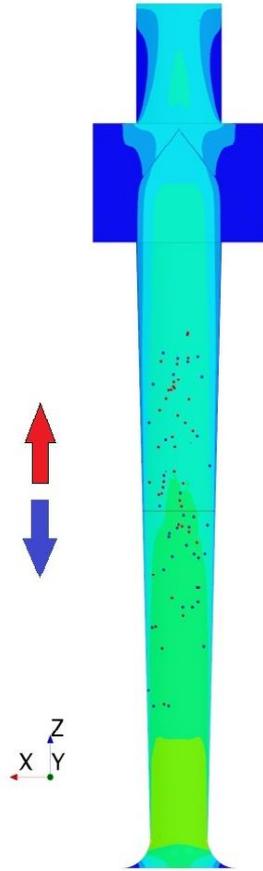


Рисунок 3.10 – Распределение частиц в поперечном сечении А-А

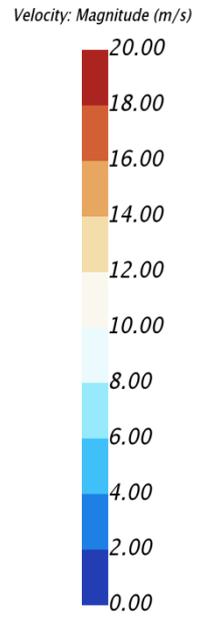
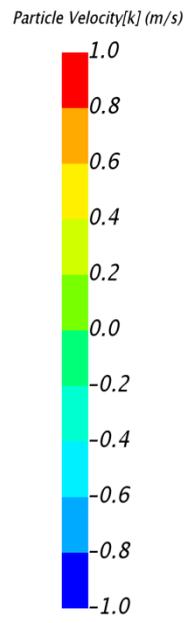
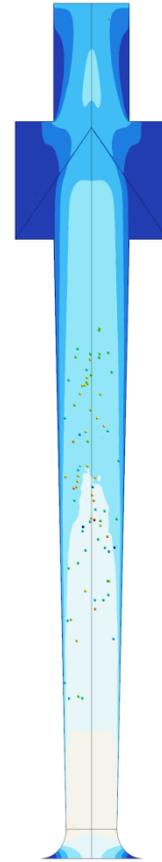
Как видно из профилей на рисунке 3.9 и распределения на рисунке 3.10 частицы синего цвета опускаются вниз в периферийной части у стенок воздуховода с более низкими скоростями.

Аналогично получены результаты для частиц диаметром 0,01 м и плотностью  $400 \text{ кг/м}^3$ , а также диаметром 0,005 м и плотностью 400 и  $800 \text{ кг/м}^3$ . На рисунке 3.11 представлены результаты численного моделирования в виде полей скоростей и областей витания частиц диаметром 0,005 и 0,01 м с плотностью 400 и  $800 \text{ кг/м}^3$ . Наглядность результатов численного эксперимента демонстрирует соответствие аэродинамических процессов описанным в литературе [64, 112], что также доказывает адекватность разработанной математической модели. На входе в исследуемый воздуховод происходит подтекание воздуха извне. До и после области витания распределение скоростей имеет вид, характерный для турбулентных потоков в каналах переменного сечения при отсутствии примеси.

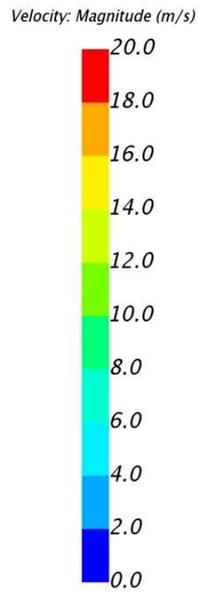
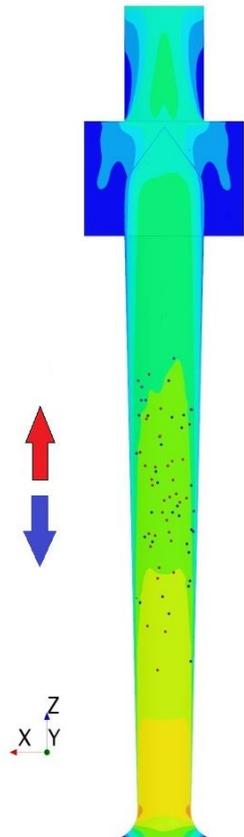
*a*



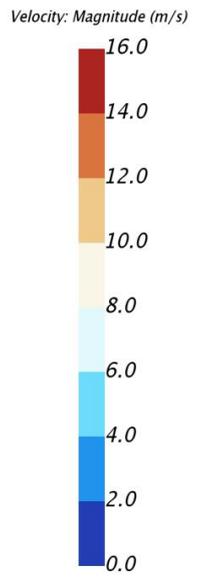
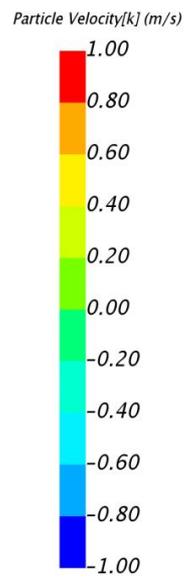
*б*



*в*



*г*



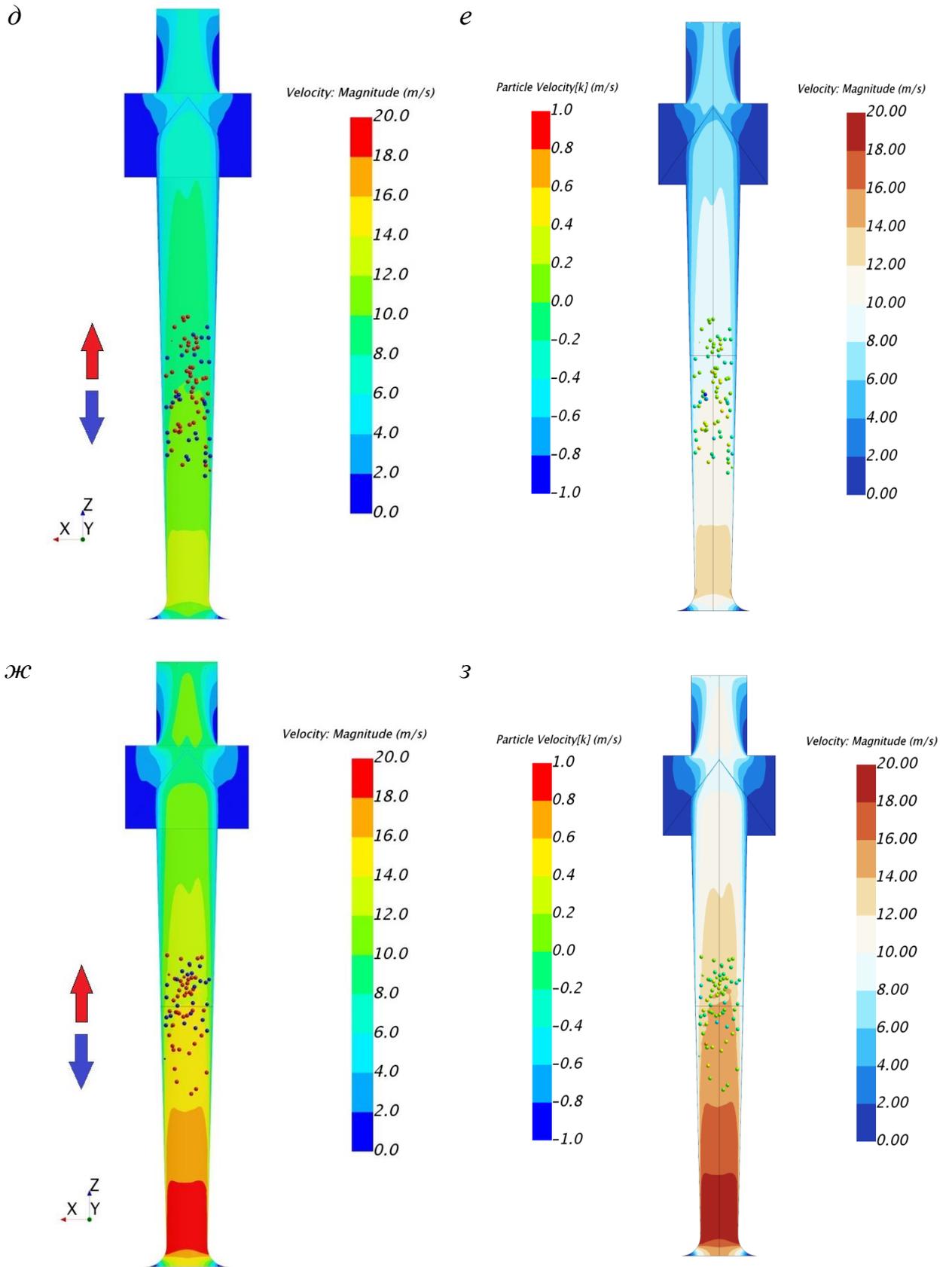


Рисунок 3.11 –Поля скоростей воздуха (а, в, д, ж). Поля скоростей частиц (б, г, е, з)

В области витания происходит естественное торможение потока вследствие взаимодействия потока с твердыми частицами определенных размеров и плотности. Характер распределения скоростей становится менее упорядоченным, существенно зависимым от размеров и плотности частиц.

В таблице 3.2 приведено сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных исследований.

Таблица 3.2 – Сравнение результатов экспериментальных исследований и численного моделирования

Диаметр, м	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скорость витания, м/с, полученная		Рисунок
		численным методом	экспериментальным методом	
0,005	400	7,9	9,1	3.9.а–3.9.б
0,005	800	9,73	9,85	3.9.в–3.9.г
0,01	400	10,1	11,38	3.9. д–3.9.е
0,01	800	13,5	11,9	3.9.ж–3.9.з

Отклонения скоростей витания, полученных в результате численного и лабораторного экспериментов, составляют 10–15 %. Анализ данных подтверждает адекватность результатов численного моделирования экспериментальным данным. Результаты численного моделирования дают возможность спрогнозировать скорости витания в реальных условиях эксплуатации систем обеспыливающей вентиляции.

### 3.3 Выводы по главе 3

1. Разработана численная модель взаимодействия потока воздуха с неподвижными твердыми частицами в воздуховоде с использованием  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, что позволило оценить влияние объемной концентрации частиц на гидродинамические параметры потока воздуха.

2. Разработана численная модель процесса витания твердых частиц в опытной установке с применением модели дискретных элементов. Результаты

численного моделирования дают возможность спрогнозировать скорости витания совокупности частиц в реальных условиях эксплуатации систем обеспыливающей вентиляции.

3. В результате анализа данных экспериментальных и теоретических исследований установлено соответствие скоростей витания как одиночных, так и совокупности твердых частиц. Данные расчетов могут быть применены для расчета систем аспирации и пневмотранспорта.

4. Разработанная модель может быть рекомендована для построения численных моделей скорости витания твердых частиц произвольной формы.

## ГЛАВА 4 РАСЧЕТ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ И ЦЕМЕНТА

Данные численного моделирования позволили разработать алгоритм расчета системы вакуумной пылеуборки, обобщающий результаты экспериментальных и теоретических исследований, представленных в работах [14, 35, 62, 66, 69, 87, 94, 121].

### 4.1 Программа расчета воздуховодов при проектировании вакуумной системы обеспыливания

Исходя из изложенного выше материала, исходными данными для проектирования и расчета систем вакуумной пылеуборки принимаются:

- физико-механические (плотность, размер, коэффициент трения) характеристики транспортируемого материала [34-35, 49];
- скорость транспортирования материала;
- требуемая производительность установки и место загрузки и выдачи материала;
- схема системы;
- количество одновременно работающих постов;
- материал трубопроводов.

Выполняется запуск программы и появляется окно исходных данных, куда заносятся свойства транспортируемого материала (рисунок 4.1).

Размер частиц, мм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text"/>	Производитель воздуховодов	<input type="text"/>	Массовая концентрация материала, кг/кг	<input type="text"/>	Число одновременно работающих постов	<input type="text"/>	<input type="button" value="сброс"/>
Плотность частиц, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value="800"/>	<input type="text"/>	Кoeffициент транспортирования частиц	<input type="text"/>	Производительность по материалу*, кг/м <sup>3</sup>	Потери давления на пылеуловителе*, Па	<input type="text"/>	<input type="button" value="расчет"/>	<input type="button" value="выход"/>	
Скорость транспортирования*, м/с	<input type="text" value="20"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Расчетная скорость транспортирования, м/с	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>			

Рисунок 4.1 – Окно для занесения свойств транспортируемого материала

При отсутствии данных или для уточнения скорости транспортирования предоставленной заказчиком, выполняется расчет скорости по формуле 2.9 или по результатам численного моделирования (глава 3, п. 3.2). После чего выбирается минимальная скорость воздуха в воздуховоде (рисунок 4.2).

Размер частиц, мм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производитель воздуховодов	<input type="text" value=""/>	Массовая концентрация материала, кг/кг	<input type="text" value=""/>	Число одновременно работающих постов	<input type="text" value=""/>	<input type="button" value="сброс"/>
Плотность частиц, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value="800"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text" value=""/>	Производительность по материалу*, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value=""/>	Потери давления на пылеуловителе*, Па	<input type="text" value=""/>	<input type="button" value="расчет"/>	<input type="button" value="Выход"/>	
Скорость транспортирования*, м/с	<input type="text" value="20"/>									
Расчетная скорость транспортирования, м/с	<input type="text" value="23"/>									

Рисунок 4.2. Выбор минимальной скорости транспортирования

Вводится значение коэффициента транспортирования частиц  $k$ , который зависит от материала и принимается от 0,5 до 1,4. Большинство сыпучих строительных материалов перемещаются отдельными частицами, для них коэффициент  $k = 0,5–0,9$  [71, 81].

Приведем пример расчета системы вакуумной пылеуборки трехэтажного производственного здания (рисунок 4.3).

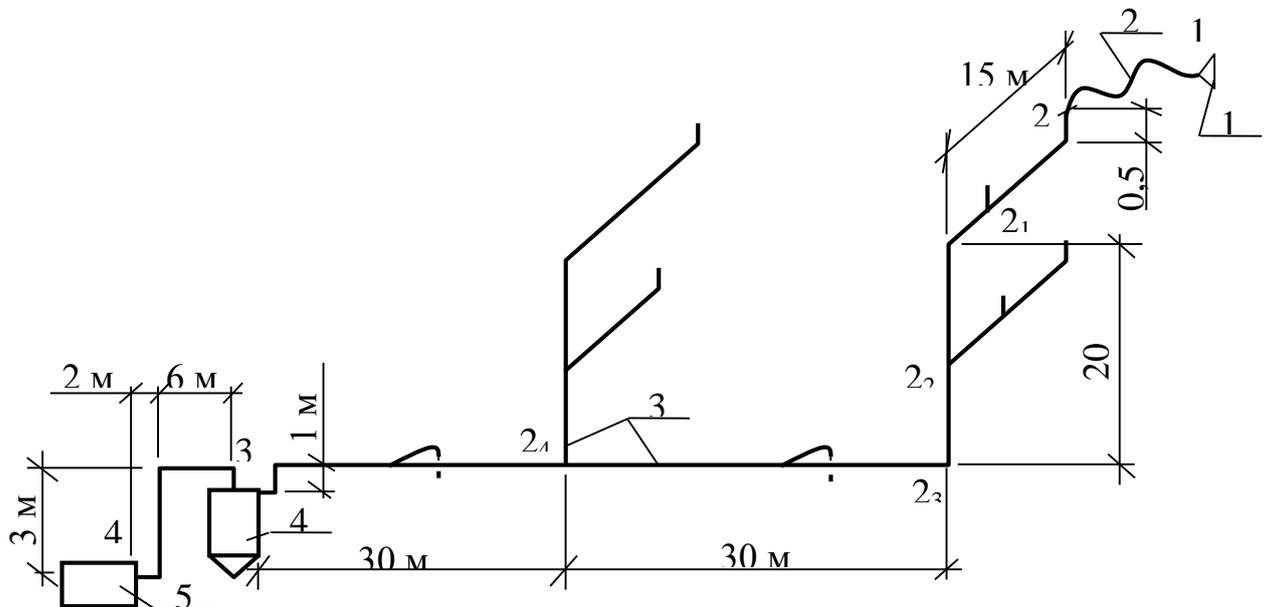


Рисунок 4.3 – Схема системы вакуумной пылеуборки: 1 – насадок; 2 – гибкий шланг; 3 – воздуховоды; 4 – пылеотделитель; 5 – вакуумный насос

Система состоит из: пылеприемников (насадок) (1), гибких шлангов (2), воздуховодов (3), пылеотделителя (4), вентиляционного агрегата (вакуумного насоса) (5).

Заносим исходные данные по системе вакуумной пылеуборки: производитель воздуховодов, число одновременно работающих постов (рисунок 4.4).

В программе заложены воздуховоды из стальных водогазопроводных труб (ГОСТ 3262-75) и воздуховоды для систем вакуумной пылеуборки шведской фирмы *DisabTella* [133]. При необходимости можно расширить список производителей.

Число одновременно работающих постов рекомендуется принимать не более трех. Дальнейшее их увеличение приведет к значительному повышению мощности вакуумного насоса.

Размер частиц, мм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производитель воздуховодов	<input type="text" value="РФ(ГОСТ_3262-75)"/>	Массовая концентрация материала, кг/кг	<input type="text"/>	Число одновременно работающих постов	<input type="text" value="1"/>	<input type="button" value="сброс"/>
Плотность частиц, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value="800"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text"/>	Потери давления на пылеуловителе*, Па	<input type="text"/>	<input type="button" value="расчет"/>	<input type="button" value="выход"/>	
Скорость транспортирования*, м/с	<input type="text" value="20"/>									
Расчетная скорость транспортирования, м/с	<input type="text" value="23"/>									

Рисунок 4.4 – Выбор производителя воздуховода

Заносится необходимая производительность по материалу или массовая концентрация материала (рисунок 4.5.) В системах вакуумной уборки особые требования к производительности по материалу часто не предъявляются, поэтому эти поля можно не заполнять.

Размер частиц, мм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производитель воздуховодов	<input type="text" value="РФ(ГОСТ_3262-75)"/>	Массовая концентрация материала, кг/кг	<input type="text" value="0,7"/>	Число одновременно работающих постов	<input type="text" value="1"/>	<input type="button" value="сброс"/>
Плотность частиц, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value="800"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text"/>	Потери давления на пылеуловителе*, Па	<input type="text"/>	<input type="button" value="расчет"/>	<input type="button" value="выход"/>	
Скорость транспортирования*, м/с	<input type="text" value="20"/>									
Расчетная скорость транспортирования, м/с	<input type="text" value="23"/>									

Рисунок 4.5 – Выбор производительности по материалу или массовой концентрации материала

В системе вакуумной уборки предусмотрен пылеуловитель, данные по потерям давления в нем заносятся в программу (рисунок 4.6).

Скриншот интерфейса программы для расчета потерь давления в пылеуловителе. Интерфейс содержит следующие элементы:

- Размер частиц, мм:
- Плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>:
- Скорость транспортирования\*, м/с:
- Расчетная скорость транспортирования, м/с:
- Минимальная скорость в воздуховоде, м/с:
- Производительность по материалу\*, кг/м<sup>3</sup>:
- Производительность воздуховодов:
- Производительность по материалу\*, кг/м<sup>3</sup>:
- Массовая концентрация материала, кг/кг:
- Потери давления на пылеуловителе\*, Па:
- Число одновременно работающих постов:
- Кнопки: сброс, расчет, выход

Рисунок 4.6 – Потери давления в пылеуловителе

Выбирается расчетная ветка системы. Она разбивается на расчетные участки. Диаметр шланга (участок 1-2) выбирается из условий его эксплуатации. Для пылеуборки, рекомендуются диаметры (50 или 60 мм) в зависимости от производителя, диаметра клапана и т.д.

При работе одного поста данную схему можно разделить на три участка (рисунок 4.7):

- участок 1-2 – шланг;
- участок 2-3 – воздуховод для транспортирования материала;
- участок 3-4 – воздуховод с меньшей концентрацией материала (после пылеотделителя).

Скриншот интерфейса программы для выбора количества участков и определения их параметров. Интерфейс содержит следующие элементы:

- Варианты: Вариант 1 | **Вариант 2** | Вариант 3 | Вариант 4
- Количество участков:
- Таблица параметров участков:
 

Участки	Диаметр воздуховода, мм	Длина шланга, м	Скорость воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Длина воздуховода, м, при направлении				Кол-во отводов	Кол-во тройников	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч
				Вертикальное вверх	Горизонтальное	Под углом вверх	Угол наклона			
Шланг	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>
2	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>
3	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>
- Кнопки: сброс, расчет, выход
- Потери давления в системе, Па:

Рисунок 4.7 – Выбор количества участков

Результатом расчета являются данные, необходимые для подбора вакуумного насоса: расход воздуха и потери давления в системе воздухопроводов.

Особенность расчета таких систем состоит в том, что окончательные величины диаметров транспортного воздуховода, производительности установки по материалу и марка вакуумного насоса определяются после нескольких вариантов аэродинамического расчета системы.

Для системы, показанной на рисунке, следует рассмотреть следующие варианты расчетов (при условии работы одного поста):

- весь воздухопровод (участок 2-3) принимается одного диаметра;
- воздухопровод разделен на участки, количество участков можно принимать разное (для данной системы от двух до 6).

В окне расчета систем указываются число расчетных участков, диаметры и длины этих участков, число отводов и тройников. Отдельно задается скорость воздуха на втором участке (не меньше скорости транспортирования). Это позволяет регулировать расход воздуха в системе пылеуборки. После выбора диаметров, программа выполняет расчет воздухопроводов. На рисунке 4.8

а)

Размер частиц, мм: 10

Плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>: 800

Скорость транспортирования\*, м/с: 20

Расчетная скорость транспортирования, м/с: 23

Минимальная скорость в воздуховоде, м/с: 23

Производительность по материалу\*, кг/м<sup>3</sup>: РФ(ГОСТ\_3262-75)

Производительность по материалу\*, кг/м<sup>3</sup>:

Массовая концентрация материала, кг/кг: 0,7

Потери давления на пылеуловителе\*, Па: 1000

Число одновременно работающих постов: 1

Кoeffициент транспортирования частиц: 0,6

сброс

расчет

Выход

Вариант 1 | Вариант 2 | **Вариант 3** | Вариант 4

Количество участков: 3

Участки	Диаметр воздухопровода, мм	Длина шланга, м	Скорость воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Длина воздуховода, м, при направлении				Кол-во отводов	Кол-во тройников	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч
				Вертикальное вверх	Горизонтальное	Под углом вверх	Угол наклона			
Шланг	50	10,0								
2	50		23		96,5			5		
3	50		30	1	13			3		241

Потери давления в системе, Па: 25815

б)

Размер частиц, мм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производитель воздуховодов	<input type="text" value="РФ(ГОСТ_3262-75)"/>	Массовая концентрация материала, кг/кг	<input type="text" value="0,7"/>	Число одновременно работающих постов	<input type="text" value="1"/>	<input type="button" value="сброс"/>
Плотность частиц, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value="800"/>	Кoeffициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value=""/>	Потери давления на пылеуловителе*, Па	<input type="text" value="1000"/>	<input type="button" value="расчет"/>	<input type="button" value="выход"/>	
Скорость транспортирования*, м/с	<input type="text" value="20"/>									
Расчетная скорость транспортирования, м/с	<input type="text" value="23"/>									

Вариант 1 | **Вариант 2** | Вариант 3 | Вариант 4

Количество участков

Участки	Диаметр воздухопровода, мм	Длина шланга, м	Длина воздуховода, м, при направлении				Под углом вверх	Угол наклона	Кол-во отводов	Кол-во тройников	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч
			Скорость воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Вертикальное вверх	Горизонтальное						
Шланг	<input type="text" value="60"/>	<input type="text" value="10.0"/>									
2	<input type="text" value="65"/>		<input type="text" value="23"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="96,5"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	
3	<input type="text" value="65"/>		<input type="text" value="28"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="13"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="370"/>	

Потери давления в системе, Па

в)

Размер частиц, мм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производитель воздуховодов	<input type="text" value="РФ(ГОСТ_3262-75)"/>	Массовая концентрация материала, кг/кг	<input type="text" value="0,7"/>	Число одновременно работающих постов	<input type="text" value="1"/>	<input type="button" value="сброс"/>
Плотность частиц, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value="800"/>	Кoeffициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value=""/>	Потери давления на пылеуловителе*, Па	<input type="text" value="1000"/>	<input type="button" value="расчет"/>	<input type="button" value="выход"/>	
Скорость транспортирования*, м/с	<input type="text" value="20"/>									
Расчетная скорость транспортирования, м/с	<input type="text" value="23"/>									

Вариант 1 | **Вариант 2** | **Вариант 3** | Вариант 4

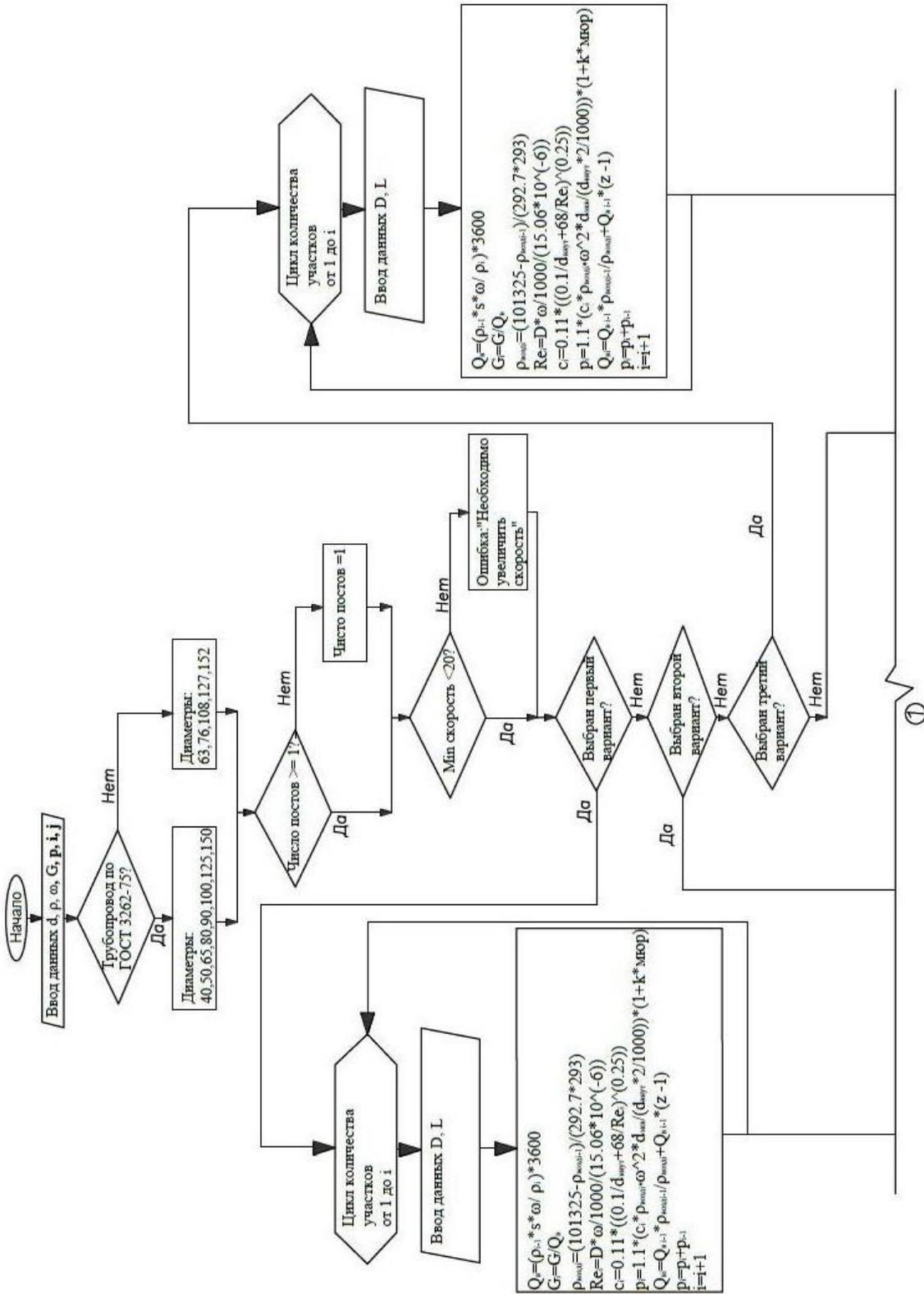
Количество участков

Участки	Диаметр воздухопровода, мм	Длина шланга, м	Длина воздуховода, м, при направлении				Под углом вверх	Угол наклона	Кол-во отводов	Кол-во тройников	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч
			Скорость воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Вертикальное вверх	Горизонтальное						
Шланг	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="10.0"/>									
2	<input type="text" value="50"/>		<input type="text" value="23"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="66,5"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	
3	<input type="text" value="65"/>		<input type="text" value="17"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="231"/>	
4	<input type="text" value="65"/>		<input type="text" value="18"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="13"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	

Потери давления в системе, Па

Рисунок 4.8 – Результаты расчета системы вакуумной пылеуборки: вариант 1 (а); вариант 2 (б); вариант 3 (в)

приведены результаты расчета системы вакуумной уборки при делении ее на три участка 1-2, 2-3 и 3-4 с диаметром шланга и воздуховода 50 мм (вариант 1), на три с диаметром шланга и воздуховода 60 мм (вариант 2), на четыре 1-2, 2-2<sub>4</sub>, 2<sub>4</sub>-3 и 3-4 (вариант 3).



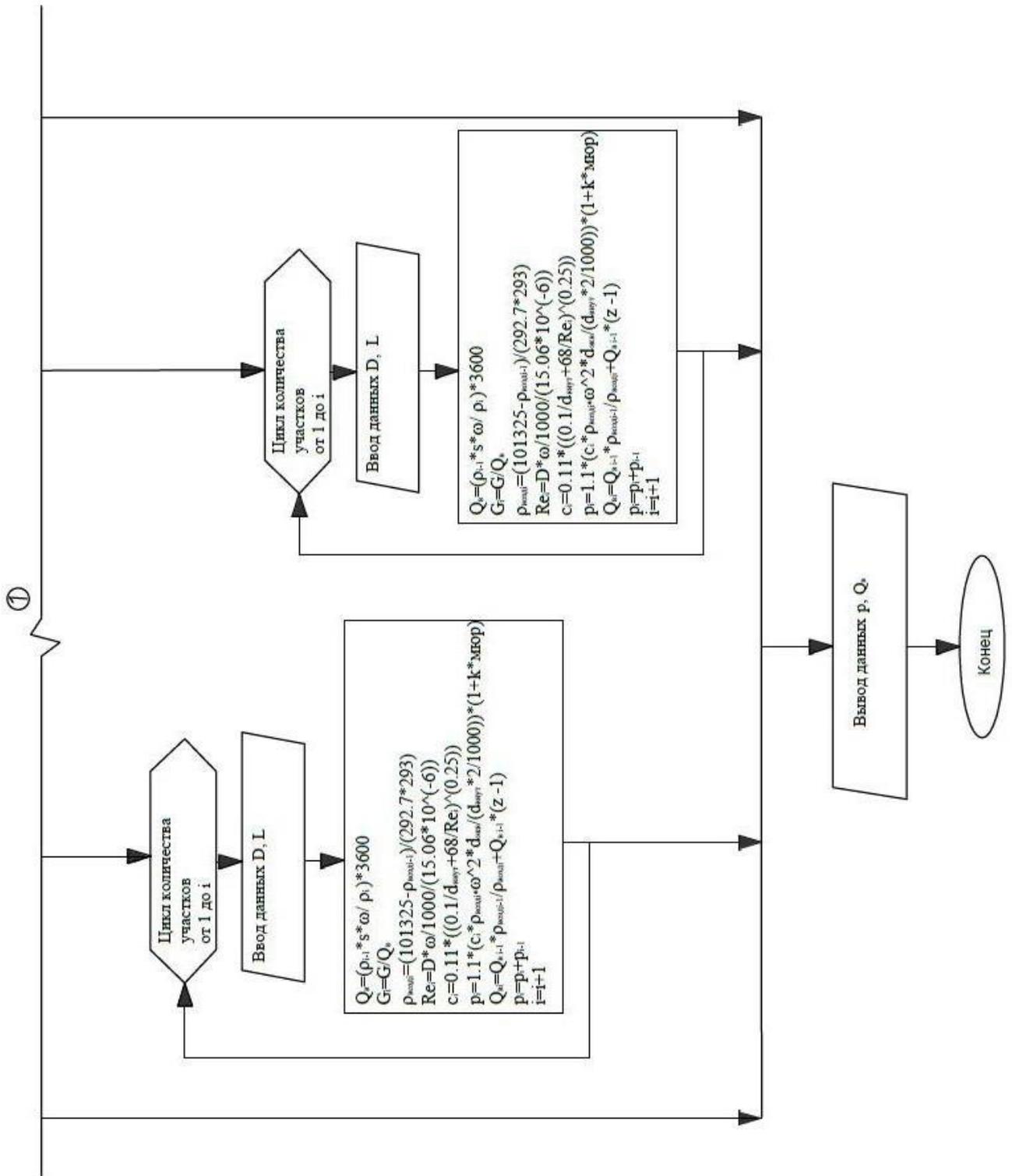


Рисунок 4.9 – Блок-схема алгоритма расчёта систем вакуумной уборки

Если на каком-то участке скорость воздуха становится меньше скорости транспортирования (рисунок 4.8.в), на данном участке необходимо уменьшить диаметр воздуховода, увеличить расход воздуха в системе, повысив скорость воздуха на втором участке или исключить этот вариант из рассматриваемых.

Значения расхода воздуха и потерь давления в системе используется для подбора вакуумного насоса

Если в техническом задании указано число одновременно работающих постов два или более, следует рассмотреть различные сочетания работы постов и выбрать самый неблагоприятный из них.

На рисунке 4.9 приведена блок-схема алгоритма расчета систем вакуумной уборки.

Окончательный вариант схемы системы принимается после подбора вакуумного насоса.

#### **4.2 Программа подбора мощности вакуумного насоса при проектировании систем аспирации и пневмотранспорта**

На основании потерь давления и расхода воздуха в системе подбирается требуемая мощность 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. Аналитические выражения полиномов формализованы с помощью стандартных функций Excel [Приложение Б].

Аэродинамические характеристики насосов заменены уравнениями регрессии [Приложение Б]. На рисунке 4.10 приведены результаты расчета для вакуумного насоса мощностью 90 кВт. Для каждого насоса исследовано три уравнения регрессии: линейное (рисунок 4.10 (а)), полином 2-й (рисунок 4.10 (б)) и 3-й степени (рисунок 4.10 (в)).

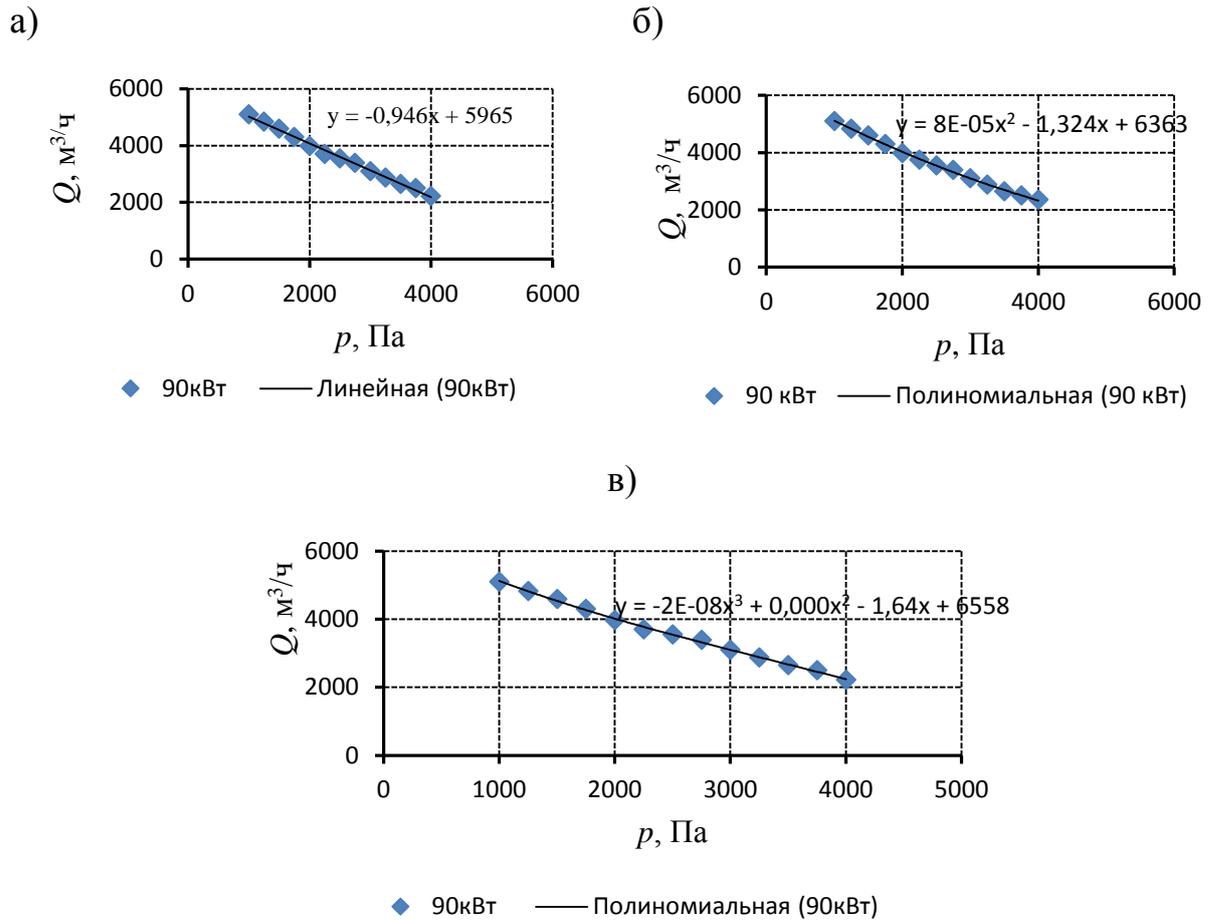


Рисунок 4.10 – Зависимости расхода воздуха от давления, описываемые полиномами а) линейное; б) полином 2-й степени; в) полином 3-й степени

Выполнено ранжирование этих уравнений по сумме квадратов разности или коэффициенту детерминации (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – 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 для насоса мощностью 90 кВт выбрано уравнение регрессии полинома 2-й степени. Подобное ранжирование проведено для всех насосов.

На основании исследований разработаны алгоритм (рисунок 4.11) и создана программа по подбору вакуумных насосов, обеспечивающая достаточно точный и быстрый подбор насосов для систем пневмотранспорта (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ №2015619490). Программа выбора насосов выполнена на языке Visual Basic. Данный вид программирования очень удобен, в связи с тем, что программа Microsoft Office Excel широко используется. Данную программу можно разделить на несколько блоков. В первом блоке выполняется ввод исходных данных, а именно должен быть введен расход воздуха в системе пневмотранспорта,  $Q$ , м<sup>3</sup>/ч, и потери давления,  $p$ , Па.

Во втором блоке программа выполняет расчет для каждого насоса формулы полинома 2-ой степени:

– для вихревого насоса A172:

$$A172 = -5 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 - 0,0375 \cdot p + 149,8;$$

– для вихревого насоса A202:

$$A202 = 6 \cdot 10^{-7} \cdot p^2 - 0,0517 \cdot p + 239,03;$$

– для вихревого насоса A238:

$$A238 = -3 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 - 0,0363 \cdot p + 319,33;$$

– для вихревого насоса A286:

$$A286 = -5 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 - 0,0463 \cdot p + 513,37;$$

– для вихревого насоса A322:

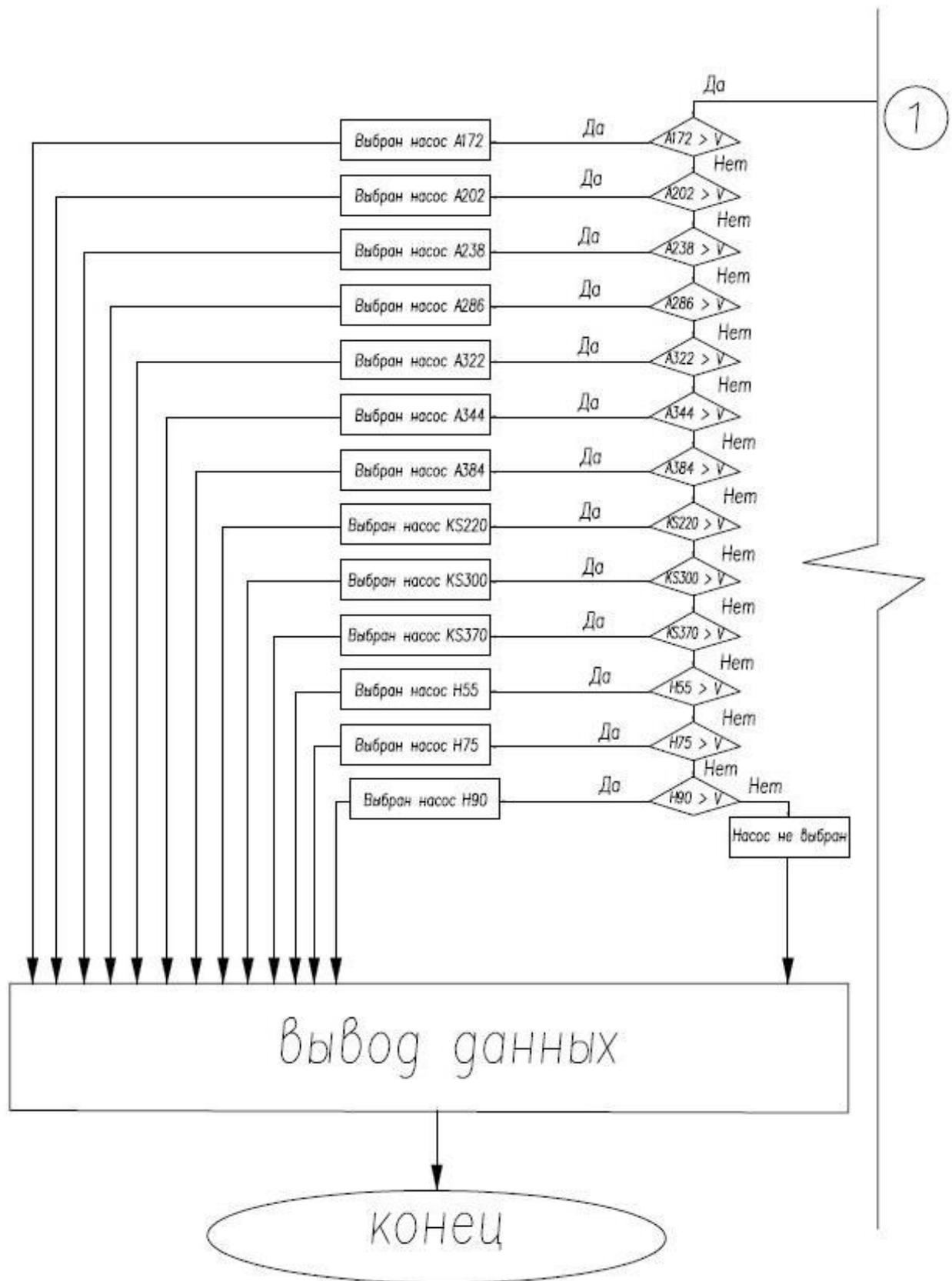
$$A322 = -7 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 - 0,1819 \cdot p + 914,72;$$

– для вихревого насоса A344:

$$A344 = -2 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 - 0,0586 \cdot p + 1132,2;$$

– для вихревого насоса A384:

$$A384 = -3 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 - 0,2558 \cdot p + 2050,1;$$



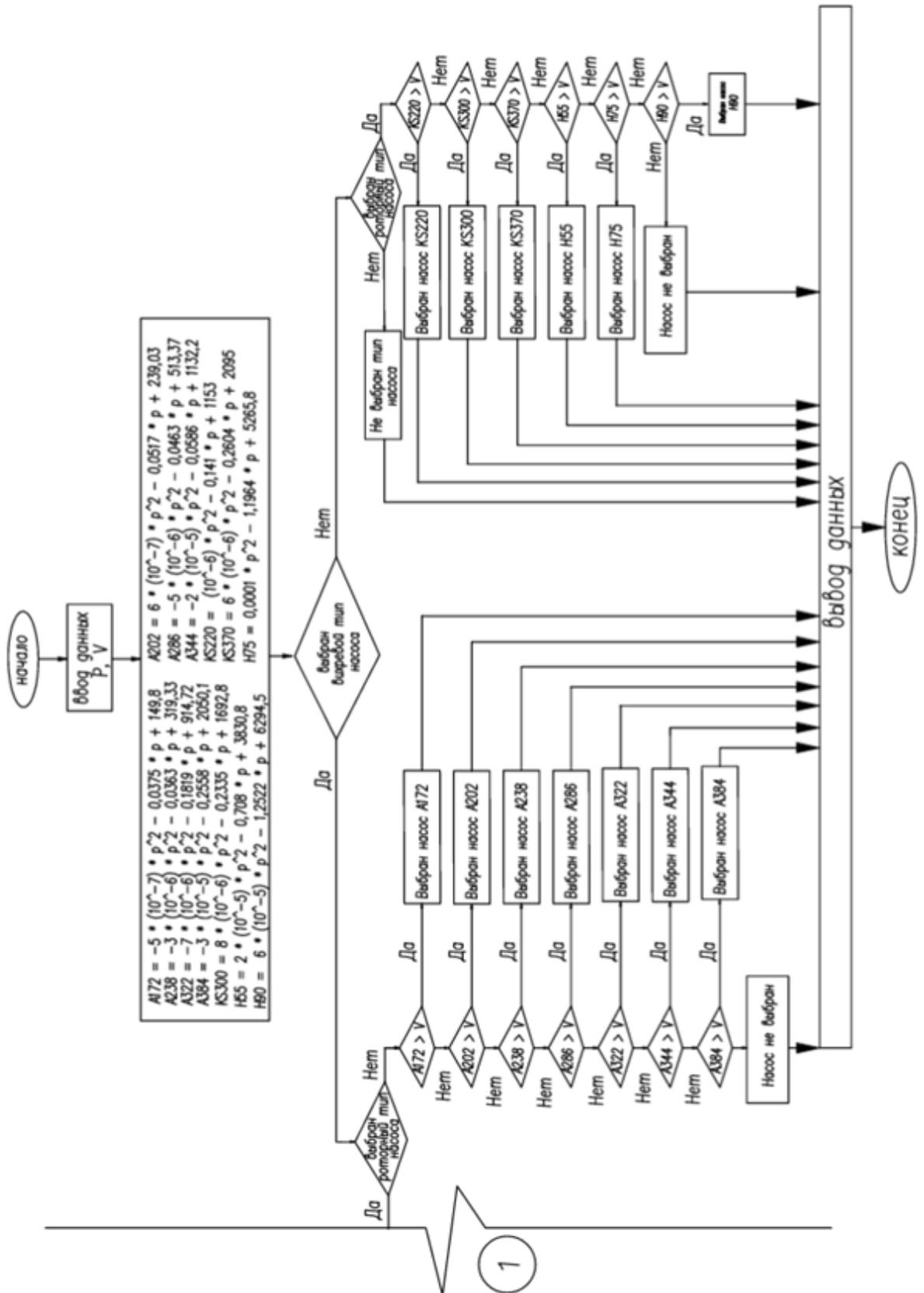


Рисунок 4.11 – Блок-схема алгоритма по подбору вакуумных насосов

– для роторного насоса KS220:

$$KS220 = 10^{-6} \cdot p^2 - 0,141 \cdot p + 1153;$$

– для роторного насоса KS300:

$$KS300 = 8 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 - 0,2335 \cdot p + 1692,8;$$

– для роторного насоса KS370:

$$KS370 = 6 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 - 0,2604 \cdot p + 2095;$$

– для роторного насоса H55:

$$H55 = 2 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 - 0,708 \cdot p + 3830,8;$$

– для роторного насоса H75:

$$H75 = 0,0001 \cdot p^2 - 1,1964 \cdot p + 5265,8;$$

– для роторного насоса H90:

$$H90 = 6 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 - 1,2522 \cdot p + 6294,5;$$

где  $p$  – потери давления, введенные ранее, Па.

В третьем блоке наша программа, исходя из выбора пользователя, выполняет подбор насоса исходя из его типа. В виду этого мы можем разделить данный блок на три подблока. В первом подблоке наша программа выполняет подбор насоса всех типов исходя из неравенства:

$$Pol > Q$$

где  $Pol$  – это рассчитанные полиномы второй степени для насоса,  $Q$  – это расход воздуха введенный ранее.

На основании данного неравенства программа выполняет подбор насоса от наименее мощного насоса вихревого типа от 5 кВт к наиболее мощному насосу роторного типа до 90 кВт.

Во втором подблоке выполняется подбор насосов только роторного типа. Пользуясь тем же неравенством, выполняется подбор наиболее подходящего насоса. Подбор осуществляется методом перебора от наименее мощного роторного насоса 22 кВт к роторному насосу наиболее мощного до 90 кВт.

В третьем подблоке третьего блока идет сравнение насосов только вихревого типа. Пользуясь все тем же неравенством, идем от наименее мощного вихревого насоса от 5 кВт к самому мощному до 22 кВт.

Так же можно выделить четвертый блок, который введен в программу по мере необходимости. На протяжении написания всей программы была предусмотрена защита от ошибок пользователя, которая позволяет избежать возникновения сбоев в работе программы. Программа оборудована защитой от не введения исходных данных, так же при отсутствии типа насоса программа будет отображать на экране системную ошибку.

Вывод данных на экран происходит сразу после сравнения типов и мощностей насоса, при условии отсутствия системных ошибок.

На рисунке 4.12 показаны результаты подбора вакуумных насосов для вариантов 1 и 2 п. 4.1 расчета воздуховодов систем вакуумной пылеуборки.

Исходные данные	Управление	Исходные данные	Управление
Потери давления, Па: 25815 Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч: 241	Заполнить Сброс Выход	Потери давления, Па: 19911 Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч: 370	Заполнить Сброс Выход
Тип насоса: <input checked="" type="checkbox"/> Роторный <input type="checkbox"/> Вихревой	Результат Требуемая мощность насоса, кВт: 30	Тип насоса: <input checked="" type="checkbox"/> Роторный <input type="checkbox"/> Вихревой	Результат Требуемая мощность насоса, кВт: 75

Рисунок 4.12 – Выбор мощности насоса

По результатам расчета принимаем вариант с условным диаметром воздуховодов 50 мм и мощностью насоса 30 кВт.

### 4.3 Экономическая оценка выполненных исследований

Оценка экономической эффективности использования системы вакуумной уборки для технологической установки «Мельница» выполнена на основе сравнительного анализа сметной стоимости и эксплуатационных затрат на предлагаемый автором вариант системы вакуумной пылеуборки с использованием вакуумного агрегата PES 301/75DISAB Engineered Vacuum Systems [133] (Приложение В) и вариант с использованием системы аспирации (Приложение В, рисунок В.1) с учетом снижения потерь готовой продукции. Результаты расчета и копии документов о внедрении приведены в Приложении В.

Описание системы вакуумной пылеуборки представлено в главе 4 п.4.1. Основные технические характеристики вакуумного агрегата PES 301/75 представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики вакуумного агрегата PES 301/75

Модель	PES-301/75
Разрежение (max), mbar	500 (800)
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч (без нагрузки)	4 600 (2 800)
Мощность двигателя, кВт	75
Поверхность фильтров, м <sup>2</sup>	20
Вес, кг	3050

Основные достоинства – высокая производительность; надежность благодаря встроенным защитным устройствам от перегрева, достижения максимального вакуума и перегрузки двигателя; легкость управления при минимальном количестве обслуживающего персонала; доступность при техническом обслуживании.

Вакуумный агрегат PES-301 для создания вакуумной системы подсоединяют к фильтр-сепаратору PES-301(класс F7 EN 1822)с помощью гибких шлангов. Данные агрегаты представляют собой стационарные установки, ко-

торые создают требуемый уровень вакуума и расход воздушного потока, необходимый для сбора мелкодисперсной пыли. В Приложении В, таблица В.1 приведен расчет стоимости данной установки по данным ООО «АЖИО».

Как было отмечено выше, в качестве базового варианта принята традиционная система аспирации, включающая 8 установок с вентиляторами В-ЦП7-40 №5, циклонами ЦН-15-500-1УП и напольными отсосами. Аксонометрическая схема приведена в Приложении В рисунок В.1. Смета на системы аспирации приведена в таблице В.2, Приложение В.

Капиталовложения по вариантам 1 и 2 приведены в таблице В.3, Приложение В.

Экономический эффект определяется путем сравнения приведенных затрат по рассматриваемым вариантам с учетом прибыли, полученной от снижения потерь в результате сбора просыпей цемента, тыс.руб/год:

$$\mathcal{E} = \Pi_2 - \Pi_1 + \text{ПР}_1 - \text{ПР}_2, \quad (4.1)$$

где  $\Pi$  – приведенные затраты;  $\text{ПР}$  – прибыль, полученная от снижения потерь в результате сбора просыпей цемента.

При расчете прибыли, полученной от снижения потерь в результате сбора просыпей цемента, учтены коэффициенты эффективности вакуумного агрегата [133] и циклонов [18].

Приведенные затраты получены по формуле, тыс.руб/год:

$$\Pi = C + E_n \cdot K, \quad (4.2)$$

где  $C$  – эксплуатационные расходы на функционирование систем;  $E_n$  – нормативный коэффициент экономической эффективности;  $K$  – капиталовложения.

Эксплуатационные расходы на системы аспирации и вакуумной пылеуборки, тыс.руб/год, определяются:

$$C = \mathcal{E} + A + \text{ТР} + \text{З} + \text{У} + \text{Д}, \quad (4.3)$$

где  $\mathcal{E}$  – стоимость электроэнергии;  $A$  – амортизационные отчисления на восстановление и капитальный ремонт основных фондов;  $\text{ТР}$  – стоимость текущего ремонта;  $\text{З}$  – заработная плата обслуживающего персонала;  $\text{У}$  – расходы

на управление, технику безопасности, охрану труда, спецодежду и др.; Д – прочие затраты.

Годовое количество электроэнергии, потребляемое вентиляционными агрегатами, вентиляторами и насосами, тыс.руб/год, определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = N_p \cdot n \cdot C_э, \quad (4.4)$$

где  $N_p$  – рабочая (используемая) мощность электродвигателей, кВт;  $n$  – продолжительность работы электродвигателей, ч/год;  $C_э$  – стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч.

Амортизационные отчисления на восстановление и капитальный ремонт принимаются по нормам, установленным и введённым в действие для систем вентиляции и аспирации – 10 %.

Расходы на текущий ремонт принимаются в размере 3 % от сметной стоимости.

Зарплата обслуживающего персонала, тыс. руб/год, рассчитывается, исходя из общего количественного состава:

$$З = A \cdot n \cdot 12 \cdot 1,3, \quad (4.5)$$

где  $A$  – среднемесячный должностной оклад, руб.;  $n$  – кол-во персонала, чел.; 12 – число месяцев в году; 1,3 – коэффициент, учитывающий средний размер премий и отчисления на социальное страхование.

Затраты на управление, охрану труда и технику безопасности, тыс.руб/год, определяются по формуле:

$$У = 0,3 \cdot (ТР + А + З). \quad (4.6)$$

Дополнительно учитываются затраты по данным предприятия в варианте 2 на выгрузку пыли из циклонов, транспортирование и складирование, а также на очистку территории.

Результаты приведены в таблице В.4, Приложение В.

Ожидаемый экономический эффект составляет 81,4 тыс. руб/год на одну мельницу.

#### **4.4 Выводы по главе 4**

1. На основании численного эксперимента разработана программа для ЭВМ для расчета диаметров воздуховодов систем вакуумной уборки.

2. Разработана компьютерная программа подбора мощности вакуумного насоса при проектировании систем вакуумной уборки (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ №2015619490).

3. Выполнено экономическое обоснование использования систем вакуумной уборки в производственном помещении. Ожидаемый экономический эффект составляет 81,4 тыс. руб/год на одну мельницу.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. На основе результатов полного трехфакторного эксперимента, выполненного на разработанной экспериментальной установке, получена эмпирическая 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  $Re_k = f(Ar, \mu)$ , 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  $k$ - $\epsilon$  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  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  и зависимости скорости транспортирования в наклонном и горизонтальном воздуховодах от скорости витания и

угла наклона. На основании экспериментальных исследований транспортирования частиц получена критериальная зависимость  $Fr_k = f(Re_{\text{вит}}, \alpha)$ .

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

8. Доказана экономическая эффективность применения системы вакуумной уборки для предприятия по производству сухих строительных смесей ООО «АЖИО».

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абрамович, Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1984. – 717 с.
2. Адлер, Ю.П., Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Александров, А.Н. Пневмотранспорт и пылеулавливающие сооружения на деревообрабатывающих предприятиях: Справочник. / А.Н. Александров, Г.Ф. Козориз; Под ред. Александрова А.Н. – М.: Лесн. пром-ть, 1988. – 248 с.
4. Алимов, Л.А. Строительные материалы: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Л.А. Алимов, В.В. Воронин. – М.: Академия, 2012. – 320 с.
5. Аэров, М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. / М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский – Л.: Химия, 1979. – 176 с.
6. Аэродинамика вентиляции: учеб. пособие для студентов учреждений высш. проф. образования / В.И. Полушкин [и др.]. М.: Академия, 2013. – 208 с.
7. Банит, Ф.Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов / Ф.Г. Банит, А.Д. Мальгин. – М.: Стройиздат, 1979. – 352 с.
8. Беляева, В.И. Энергосбережение и снижение выбросов загрязняющих веществ при обжиге цементного клинкера / В.И. Беляева, В.К. Классен // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – №6. – С. 26-28.
9. Богданов, А.Н. Нестационарное течение пылевоздушных потоков в осесимметричных каналах теплоэнергетических установок: автореф. дис. ...

канд. техн. наук: 01.04.014 / Александр Нетфуллович Богданов. – Казань: 2009. – 16 с.

10. Бретшнайдер, Б. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль: Пер. с англ. / Под ред. А.Ф. Туболкина. – Л.: Химия, 1989. – 288 с.

11. Бусройд, Р. Течение газа со взвешенными частицами: пер. с англ. // Под ред. З.Р. Горбиса. – М.: Мир, 1975. – 373 с.

12. Бутаков, С.Е. Аэродинамика систем промышленной вентиляции / С.Е. Бутаков. – М.: Профиздат, 1949. 270 с.

13. Бухмистров В.В. Математическое моделирование двухфазных потоков в установках пневмотранспорта мелкодисперсных материалов / В.В. Бухмистров, Г.А. Родионов // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 5 – С. 1-5.

14. Власов, П.Ф. Вентиляция, кондиционирование воздуха и пневматический транспорт на табачных фабриках. / П.Ф. Власов – М: Пищепромиздат, 1963. – 156 с.

15. Воробьев, А.А. Пневмотранспортные установки. Справочник / А.А. Воробьев, А.И. Матвеев, Г.С. Носко, М.М. Шапунов, Б.А. Аннинский – Л.: Издательство «Машиностроение», 1969.

16. Воронин, Ю.Б. Пневмотранспорт измельченной древесины. / Ю.Б. Воронин – М.: Лесн. пром-ть, 1977. – 208 с.

17. Воскресенский В.Е. Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообрабатывающих предприятиях. Теория и практика: в 2 т. – Т. 1: аспирация и транспортные пневмосистемы: Учебное пособие. / В.Е. Воскресенский – СПб.: Политехника, 2008. – 430 с.

18. Воскресенский, В.Е. Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообрабатывающих предприятиях. Теория и практика: в 2 т. – Т. 2, ч. 1: Системы пылеулавливания: учебное пособие. / В.Е. Воскресенский – СПб.: Политехника, 2009. – 299 с.

19. Воскресенский, В.Е. Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообрабатывающих предприятиях. Теория и практика: в 2 т. – Т. 2, ч. 2: Системы вентиляции: учебное пособие. / В.Е. Воскресенский – СПб.: АВОК «Северо-Запад», 2012. – 704 с.
20. Гастерштадт, И. Пневматический транспорт. / И. Гастерштадт – Л.: Сев.-Зап. обл. промбюро ВСНХ, 1927.
21. Голобурдин, А.И. Пневмотранспорт в резиновой промышленности. / А.И. Голобурдин, Е.В. Донат – М.: Химия, 1983. – 160 с.
22. Горчаков, Г.И. Строительные материалы / Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов – М.: Стройиздат, 1986г. – 688 с.
23. ГОСТ 12.3.018-79. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний // Система стандартов безопасности труда. ч. 2 / Гос. стандарты Союза ССР. – М., 1980. – С. 132-142.
24. Грачев, Ю.Г. Очистка воздуха зданий от вредных веществ: учеб. пособие / Ю.Г. Грачев Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1996. – 280 с.
25. Гримитлин, А.М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования / А.М. Гримитлин, Т.А. Дацюк, Д.М. Денисихина. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2013. – 192 с.
26. Гримитлин, А.М. Отопление и вентиляция производственных помещений / А.М. Гримитлин, Т.А. Дацюк, Г.Я. Крупкин, А.С. Стронгин, Е.О. Шилькрот. – СПб.: АВОК Северо-Запад, 2007. – 399 с.
27. Гринев, К.М. Пневматический транспорт в цементной промышленности / К.М. Гринев, М.Н. Крашенинников, А.П. Кротков. – М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1951. – 139 с.
28. Дацюк, Т.А. Моделирование рассеивания вентиляционных выбросов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.03/ Тамара Александровна Дацюк; СПбГАСУ; СПб., 2000. – 296 с.

29. Дацюк, Т.А., Совершенствование принципов расчета систем обеспечения микроклимата зданий / Т.А. Дацюк, В.В. Дерюгин, Ю.Н. Леонтьева // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2002. – №8. – С. 67-73.

30. Дацюк, Т.А., Новая технология проектирования систем обеспечения микроклимата зданий / Т.А. Дацюк, В.Ф. Васильев, В.В. Дерюгин, Ю.П. Ивлев // Вестник гражданских инженеров. – 2005. – №3. – С. 57-62.

31. Денисихина, Д.М. Особенности численного моделирования поведения воздушных потоков в объемах концертных и театральных залов [Электронный ресурс] / Д.М. Денисихина // Интернет - журнал Науковедение. – 2014. – №3 (22); Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN314.pdf>.

32. Денисихина, Д.М. Использование программы STAR-CCM+ при проектировании систем вентиляции: учеб. пособие / Д.М. Денисихина; СПбГАСУ. – СПб, 2013. – 68 с.

33. Джабаров, Г.Д. Первичная обработка хлопка. Учебник для вузов / Г.Д. Джабаров, С.Д. Балтабаев, Д.А. Котов. – М.: Легкая индустрия, 1978. 430 с.

34. Донат, Е.В. Пневматическая уборка пыли в цехах промышленных предприятий / Е.В. Донат – М.: Издательство ВЦСПС Профиздат, 1960. – 170 с.

35. Евтюков, С.А. Пневматический транспорт в строительстве / С.А. Евтюков, М.М. Шапунов Под общей редакцией Евтюкова С.А. ИД «Петрополис», Санкт-Петербург, 2012 г. – 306 с.

36. Евтюков, С.А. Справочник по пневмокомплексам и пневмотранспортному оборудованию / С.А.Евтюков, М.М. Шапунов Под общ. ред. Шапунова М.М. – СПб.: ООО «Издательство ДНК», 2005. – 456 с.

37. Евтюков, С.А. Теоретическое обоснование процесса пневмотранспорта слежавшихся сыпучих строительных материалов / С.А. Евтюков, А.А. Шиманова, В.Н. Горшков // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 6 (59) – С. 200-204.

38. Жихарев, Е.А. Экспериментальное исследование характера движения частиц в трубопроводах пневматического транспорта / Е.А. Жихарев // Инженерно-физический журнал, т.2, №2, 1959. – С. 25-31.
39. Зимон, Д.А. Адгезия пыли и порошков / Д.А. Зимон – М.: Химия, 1976. 432 с.
40. Зуев, Ф.Г. Справочник по транспортирующим и погрузочно-разгрузочным машинам. / Ф.Г. Зуев, Н.А. Лотков, А.В. Полухин, А.В. Тантлевский – М.: Колос, 1983. – 319 с.
41. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд., переаб. и доп./ И.Е Идельчик // Под ред. М.О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
42. Казаков, А.П. Пневматический транспорт. Устройство, теория и расчет / А.П. Казаков. – Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1966. – 79 с.
43. Калинушкин, М.П. Вакуумная пылеуборка на предприятиях легкой промышленности./ М.П. Калинушкин, Ю.Г. Грачев. – М.: Легпромбытиздат, 1987. – 72 с.
44. Калинушкин, М.П. Пневматический транспорт в строительстве. / М.П. Калинушкин, З.Э. Орловский, И.С. Сегаль. – М.: Стройиздат, 1961. – 160 с.
45. Калинушкин, М.П. Пневмотранспортное оборудование: Справочник. / М.П. Калинушкин, М.А. Коппель, В.С. Серяков, М.М. Шапунов; Под общ.ред. Калинушкина М.П. – Л.: Машиностроение. Ленингр.отд-ние, 1986. – 286 с.
46. Калинушкин, М.П. Вентиляторные установки. / М.П. Калинушкин. – М.: Высшая школа, 1967. – 259 с.
47. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие для вузов / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.

48. Клячко, Л.С. Пневматический транспорт сыпучих материалов / Л.С. Клячко, Э.Х. Одельский, Б.М. Хрусталеv. – Минск: Наука и техника, 1983. – 216 с.
49. Корнеев, В.И. Сухие строительные смеси (состав, свойства): учеб. пособие / В.И. Корнеев, П.В. Зозуля. – М.: РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ», 2010. – 320 с.
50. Коузов, П.А. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. – 2-е изд., перераб. и доп. / П.А. Коузов, А.Д. Мальгин, Г.М. Скрябин. – СПб: Химия, 1993. – 320 с.
51. Кузнецов, Ю.М. Пневмотранспорт: теория и практика. / Ю.М. Кузнецов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 61 с.
52. Курников, А.А. Пневматическая пылеуборка цехов машиностроительных заводов. / А.А. Курников, В.А. Курнико. – М.: Машиностроение, 1983. – 152 с.
53. Лабораторный практикум по теплогазоснабжению и вентиляции / под ред. Одельский Э.Х., Мухин О.А. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск: Выш. школа, 1973. – 208 с.
54. Ладыгичев, М.Г. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: справочное издание. / М.Г. Ладыгичев, Г.Я. Бернер – М.: Теплотехник, 2004. – 696 с.
55. Ларионов, В.А. Пневмотранспорт измельченной древесины с переменным расходом воздуха. / В.А. Ларионов. – М.: Лесн. пром-ть, 1980. – 120 с.
56. Лель, Р.В. Статистическая обработка и планирование экспериментов в технологии машиностроения / Р.В. Лель. – Горький: ГГУ, 1979. – 67 с.
57. Лобаев, Б.Н. Расчет воздухопроводов вентиляционных, компрессорных и пневмотранспортных установок / Б.Н. Лобаев. – Киев: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре УССР, 1959. 197 с.

58. Логачев, И.Н. Аэродинамические основы аспирации: Монография / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. – СПб.: Химиздат, 2005. – 659 с.
59. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
60. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е.Н. Львовский. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.: ил.
61. Малевич, И.П. Пневматический транспорт сыпучих строительных материалов. / И.П. Малевич, А.И. Матвеев. – М.: Стройиздат, 1979. 143 с., ил.
62. Малевич, И.П. Транспортировка и складирование порошкообразных строительных материалов. / И.П. Малевич, В.С. Серяков, А.В. Мишин. – М.: Стройиздат 1984. – 184 с.
63. Мамошин, А.Е. Классификация, псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. / А.Е. Мамошин. – Екатеринбург: Издательство АМБ, 2004. – 126 с.
64. Марон, В.И. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах / В.И. Марон. – Лань 2012. – 256 с.
65. Мартянова, А.Ю. Снижение запыленности воздуха рабочей зоны цементных заводов / А.Ю. Мартянова, И.И. Суханова // Вестник гражданских инженеров. – 2011. - № 3 (28) – С. 87-92.
66. Мартянова, А.Ю. Определение скорости витания монодисперсных строительных материалов по данным экспериментальных исследований / А.Ю. Мартянова, И.И. Суханова // Вестник гражданских инженеров. – 2015. - № 5 (52) – С. 186-190.
67. Мартянова, А.Ю. Численное моделирование воздействия воздушного потока на шарообразные частицы в воздуховоде круглого сечения [Электронный ресурс] / А.Ю. Мартянова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2; Режим доступа: <http://www.science-education.ru/129-22466>.

68. Мартьянова, А.Ю. Влияние массовой и объемной концентрации на скорость витания твердых частиц / А.Ю. Мартьянова // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2 (55) – С. 143-147.

69. Мартьянова, А.Ю. Развитие численных методов расчета систем вакуумной уборки / А.Н. Колосницын, А.Ю. Мартьянова // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 6 (59) – С. 151-155.

70. Микольский, Ю.Н. Пневматический транспорт в производстве строительных материалов. / Ю.Н. Микольский. – Киев: Гос. Изд-во лит.постр-ву и архитектуре УССР, 1962. – 103 с.

71. Микульский, В.Г. Строительные материалы. Материаловедение. технология конструкционных материалов: [учебник для студентов строительных специальностей вузов] / В.Г. Микульский [и др.] ; ред В.Г. Микульский. – М.: АСВ, 2007. – 520 с.

72. Минко, В.А. Технология очистки газов: учеб. пособие / В.А. Минко, В.Ф. Подпоринов, М.И. Кулешов. – Белгород, изд. МИСИ и БТИСМ, 1982, 105 с.

73. Минко, В.А. Комплексное обеспыливание производственных помещений при производстве строительных материалов. Сборник научных трудов/ В.А. Минко. – М., Изд. МИСИ, БТИСМ, 1984. – 197 с.

74. Минко, В.А. Комплексное обеспыливание помещений при производстве цемента / В.А. Минко, В.Г. Шаптала / Цемент. – 1990. - № 12. – С. 15-17.

75. Минко, В.А. Комплексные системы обеспыливания при переработке сыпучих материалов / Сб. тр. Междунар. научн-техн. конф. «Высокие технологии в экологии» – Воронеж, 1998. – С.123-127.

76. Минко, В.А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов / В.А. Минко. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1981. – 176 с.

77. Минко, М.В. Исследование механизмов процесса и разработка методов расчета теплообмена двухфазных потоков в каналах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.014 / Мария Вячеславовна Минко. – М.: 2012. – 22 с.
78. Надеин, А.А. Пневмотранспорт сыпучих материалов / А.А. Надеин, Э.А. Абраменков, Р.Ш. Шабанов. – Новосибирск: НГАСУ, 1999. – 64 с.
79. Недин, В.В. Современные методы исследования рудничной пыли и эффективности противопылевой вентиляции / В.В. Недин, О.Д. Нейков. – М.: Недра, 1967. – 163 с.
80. Нейков, О.Д. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков / О.Д. Нейков, И.Н. Логачев. – М.: Металлургия, 1981. – 192 с.
81. Обеспыливающая вентиляция: учеб. пособие. / В.А. Минко, И.Н. Логачев [и др.]. – М.: Теплотехник, 2009. – 464 с.
82. Омельчук, В.С. Аспирация машин и пневмотранспорт / В.С. Омельчук. – М.: МТИ, 1984. – 47 с.
83. Основы термогазодинамики двухфазных потоков и их численное решение: учеб. пособие / В.А. Барилевич. – СПб.: Изд. Политехнического университета, 2009. – 425 с.
84. Пирумов, А.И. Обеспыливание воздуха. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
85. Платонов, В.С. Пути повышения эффективности производства цемента. / В.С. Платонов, Е.А. Малооков. – СПб.: СЗПИ, 2000. – 74 с.
86. Полонский, В.М. Охрана воздушного бассейна заводов строительной индустрии: учеб. пособие. / В.М. Полонский – Самара, 2066. – 200 с.
87. Полушкин, В.И. Вентиляция: учеб. пособие для студ. высш. Учеб. Заведений / В.И. Полушкин, С.М. Анисимов, В.Ф. Васильев, В.В. Дерюгин. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 416 с.

88. Полушкин, В.И. Очистка воздуха от пыли: учеб. пособие / В.И. Полушкин, Н.Ф. Разумов, Л.Е. Шувалова – СПб.: С.-Петербург. гос. архитектур.-строит.ун-т, 1996. – 100 с.
89. Полушкин, В.И. Централизованная пылеуборка производственных помещений / В.И. Полушкин, И.И. Суханова / Наука и инновации в современном строительстве – 2007: Сборник материалов Междунар. научно-практич. конференции, посвящ. 175-ю СПбГАСУ. – СПб, 2007. – С 223-226.
90. Полушкин, В.И. Результаты исследования систем пневмотранспорта и пылеуборки / В.И. Полушкин, И.И. Суханова // Вестник МАНЭБ. – 2008. – №1. – С. 70-78.
91. Полушкин, В.И. Двухступенчатая очистка воздуха от пыли / В.И. Полушкин, И.И. Суханова / Региональные и муниципальные проблемы природопользования: Материалы 10-й Всероссийской науч.-практ. конф. – Киров, 2008. – С. 137-139.
92. Полушкин, В.И. Поведение частиц в прямолинейном потоке воздуха / В.И. Полушкин, И.И. Суханова / Доклады 64-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Ч. 1 – СПб, 2008 – С. 114 – 118.
93. Полушкин, В.И. Пневматическая пылеуборка в производственных помещениях / В.И. Полушкин, Э.А. Ситников, И.И. Суханова // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 5. – С. 23-27.
94. Поляков, В.В. Насосы и вентиляторы: Учеб. для вузов / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.:ил.
95. Попов, Л.Н. Строительные материалы, изделия и конструкции: Учебное пособие / Л.Н. Попов. – М.: ОАО «ЦПП», 2010. – 467 с.
96. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны: гигиенические нормативы. ГН 2.2.5.1313–03. – М.: СТК Аякс, 2003. – 268 с.

97. Проектирование промышленной вентиляции: Справочник / Б.М. Торговников, В.Е. Табачник, Е.М. Ефанов. – Киев: Будівник, 1983. – 256 с.
98. Разумов, И.М. Пневмо- и гидротранспорт в химической промышленности. (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии.) / И.М. Разумов. – М.: «Химия», 1979 г. – 248 с.
99. Рыбьев, И.А. Строительное материаловедение: учеб. пособие для строит. спец. вузов / И.А. Рыбьев. – М.: Высш. шк., 2002. – 701 с.
100. Святков, С.Н. Пневматический транспорт измельченной древесины / С.Н. Святков. – М.: Лесн. пр-ть, 1966. – 320 с.
101. Смирнова, Е.Э. Многокомпонентные цементы с использованием попутных продуктов цветной и черной металлургии: дис. ... канд. техн. наук / Елена Эдуардовна Смирнова; СПбГТИ(ТУ);. науч. рук. В.В Андреев. – СПб., 1996. – 160 с.
102. Солопов, С.Г. Вопросы пневмотранспорта фрезерного торфа в горизонтальных трубах / С.Г. Солопов, Л.О. Горцакалян // Ж. Торфяная промышленность №6, 1961. – с. 6-11.
103. Сотников, А.Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха // Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС (в 2-х томах с продолжением). Т. I. / А.Г. Сотников. – СПб., 2013. 423 с.
104. Сотников, А.Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха // Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС (в 2-х томах с продолжением). Т. II. / А.Г. Сотников. – СПб., 2013. 430 с.
105. Сотников, А.Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции: в двух томах. Том II, ч. 1. / А.Г. Сотников. – СПб.: 2006. – 416 с.

106. Сотников, А.Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции: в двух томах. Том II, ч. 2. / А.Г. Сотников. – СПб.: 2007. – 512 с.
107. СП 50.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 23–02–2003. Тепловая защита зданий. – Введ. 2013–07–01. – М.: Минрегион России, 2013. –95 с.
108. Спиваковский, А.О. Конвейерные установки. Часть IV ОНТИ НКТП / А.О. Спиваковский. – Киев: Государственное научно-техническое издательство Украины, 1935. 508 с.
109. Страхович, А.И. Основы теории и расчета пневматических транспортных установок. / А.И. Страхович. – Л.: ОНТИ НКТП, Главная редакция литературы по машиностроению и металлообработке, 1934.
110. Сугак, Е.В. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами / Е.В. Сугак, Н.А. Войнов, Н.А. Николаев. – Казань: РИЦ «Школа», 1999. – 224 с.
111. Суханова, И.И. Комплексное использование вакуумного оборудования на цементных заводах / И.И. Суханова / Региональные и муниципальные проблемы природопользования: Материалы 10-й Всероссийской науч.-практ. конф. – Киров, 2008. – С. 136-137.
112. Терехов, В.И. Влияние частиц на структуру течения и дисперсию твердой примеси в двухфазной осесимметричной струе / В.И. Терехов, М.А. Пахомов // Журнал теоретической физики. – 2011. – Т.81 – вып. 10. – С. 27–35.
113. Тимонин, А.С. Инженерно-экологический справочник. Т.1. / А.С. Тимонин. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2003. – 917 с.
114. Тодес, О.М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. / О.М. Тодес, О.Б. Цитович. – Л.: Химия, 1981. – 296 с., ил.

115. Успенский, В.А. Пневматический транспорт материалов во взвешенном состоянии. / В.А. Успенский. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1952. – 150 с.
116. Фукс, Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. / Н.А. Фукс. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1958. – 88 с.
117. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. – М.: АН СССР, 1957.
118. Фукс, Н.А. Высокодисперсные аэрозоли / Н.А. Фукс, А.Г. Стругин. – М, 1969. – 80 с.
119. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
120. Швыдкий, В.С. Очистка газов: Справочное издание. / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2005. – 640 с.
121. Штокман, Е.А. Вентиляция, аспирация и пневмотранспорт на табачно-ферментационных предприятиях. / Е.А. Штокман, М.Ш. Харитон. – М.: Легкая и пищевая пром-ть, 1983. – 160 с.
122. Шумилов, Р.Н. Теоретические основы вентиляции. Тепло- и массообмен / Р.Н. Шумилов. – Екатеринбург.: УГТУ, 1995. – 1995. – 68 с.
123. CCM USER GUIDE STAR-CD VERSION 4.00 ©, CD Adapco Group, 2006 (4)
124. Di Renzo, A. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes [Electronic resource] / Alberto Di Renzo, Francesco Paolo Di Maio // Chemical Engineering Science. – 2004. – Vol. 59. – P. 525–541.
125. Goldschmidt, V.W. Turbulent diffusion of small particles suspended in turbulent jets/ V.W.Goldschmidt, M.K. Householder, G. Ahmadi, S.C. Chuang // Progress in heat and mass transfer. – 1972. – V.6- pp. 487–508.
126. Issa, R.I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator splitting / R.I. Issa // J.Comp. Phys. – 1986. – Vol. 62. – P. 40-65.

127. Johnson, K.L. Contact Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

128. Launder, B. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc Letters [Electronic resource] / B. Launder, B. Sharma // Heat Mass Transfer. – 1974. – Vol. 1. – P 131-138/

129. Pandelidis, D. Application of a statistief design for analyzing basic performance characteristics of the cross-flow Maisotsenko cycle heat exchanger [Electronic resource] / D. Pandelidis, S. Anisimov // Heat and Mass Nransfer. – 2016. – Vol.95. – P. 45–61.

130. Stüben, K., Trottenberg, U. Multigrid methods: Fundamental algorithms, model problem analysis and applications / K. Stüben, U. Trottenberg// Lecture Notes in Mathematics. 1996, Springer. P. 1-176. (5)

131. Goodfellow, H. Industrial Ventilation. Design Guidebook/ H/ Goodfellow, E. Tahti. – San-Diego et al.: Academic Press, 2001. – 1519 p.

132. Scott Neidigh Introduction to the Theoretical and Practical Principles of Pneumatic Conveying [Electronic resource] / Scott Neidigh. – Mode of access: <http://neuro.de/wp-content/uploads/2014/03/PT12-Teorie-in-Pneumatic-Conveying.pdf>.

133. Disab vacuum technology [Electronic resource]: Accessories and Spare parts for Stationary and Mobile Vacuum Cleaning Systems. – Mode of access: [http://disab.com/wp-content/uploads/2014/07/DISAB/-Tella\\_Catalogue\\_ENG\\_2014\\_07\\_web.pdf](http://disab.com/wp-content/uploads/2014/07/DISAB/-Tella_Catalogue_ENG_2014_07_web.pdf)

134. Industrielle Reinigungsunternehmen [Electronic resource]: // Wieland Lufttechnik. – Mode of access: [http://wieland-luft.de/branchen uebersicht/industrielle-reinigungsunternehmen /](http://wieland-luft.de/branchen uebersicht/industrielle-reinigungsunternehmen/).

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

Таблица А.1 – Результаты исследования влияния размера на скорость витания твердой частицы

№ эксперимента	Размер частицы $d$ , мм	Плотность частицы $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр трубопровода $D$ , мм	Показания микроманометра $l$ , мм	Угол наклона шкалы, $k_H$	Статическое давление $P_{ст}$ , Па	Расход воздуха $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	Скорость витания эксперимент, $w_{вит}$ , м/с	Скорость витания среднее, $w_{ср}$ , м/с	Скорость витания расчетная, $w_{рч}$ , м/с [27]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
1	15	400	122	112	0,2	219,74	0,148	12,65	12,72	12,75
2		400	121	110	0,2	215,82	0,147	12,74		
3		400	123	118	0,2	231,52	0,152	12,77		
1	10	400	118	58	0,2	113,80	0,106	9,73	9,90	10,41
2		400	116	52	0,2	102,02	0,101	9,53		
3		400	113	56	0,2	109,87	0,105	10,43		
1	7,5	400	117	60	0,2	117,72	0,108	10,07	9,37	9,01
2		400	118	50	0,2	98,10	0,099	9,03		
3		400	115	45	0,2	88,29	0,094	9,02		
1	5	400	113	29	0,2	56,90	0,075	7,50	6,96	7,36
2		400	112	23	0,2	45,13	0,067	6,80		
3		400	110	20	0,2	39,24	0,062	6,57		
1	2,5	400	133	20	0,2	39,24	0,062	4,50	5,03	5,20
2		400	125	17	0,2	33,35	0,058	4,69		
3		400	113	18	0,2	35,32	0,059	5,91		

ПРИМЕЧАНИЕ: Обработка результатов таблицы А.1 представлена в таблице А.3.

Таблица А.2 – Результаты исследования влияния плотности на скорость витания твердой частицы

№ эксперимента	Размер частицы $d$ , мм	Плотность частицы $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр трубопровода $D$ , мм	Показания микроманометра $l$ , мм	Угол наклона шкалы, $k_H$	Статическое давление $P_{ст}$ , Па	Расход воздуха $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	Скорость витания эксперимент, $w_B$ , м/с	Скорость витания среднее, $w_{ср}$ , м/с	Скорость витания расчетная, $w_{рч}$ , м/с [27]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
1	5	2300	110	162	0,2	317,84	0,178	19,41	18,14	17,65
2		2300	115	174	0,2	341,39	0,184	17,74		
3		2300	125	209	0,2	410,06	0,202	17,28		
1	5	2200	120	175	0,2	343,35	0,185	16,62	17,85	17,26
2		2200	118	197	0,2	386,51	0,196	18,56		
3		2200	112	168	0,2	329,62	0,181	18,38		
1	5	1500	130	186	0,2	364,93	0,191	13,51	14,02	14,25
2		1500	120	156	0,2	306,07	0,175	14,45		
3		1500	118	122	0,2	239,36	0,154	14,11		
1	5	800	124	88	0,2	172,66	0,131	10,85	10,55	10,41
2		800	120	73	0,2	143,23	0,119	10,38		
3		800	110	54	0,2	105,95	0,103	10,42		
1	5	400	129	29	0,2	56,90	0,075	7,50	6,96	7,36
2		400	121	23	0,2	45,13	0,067	6,80		
3		400	117	20	0,2	39,24	0,062	6,57		

ПРИМЕЧАНИЕ: Обработка результатов таблицы А 2 представлена в таблице А 4.

Таблица А.3 – Обработка результатов экспериментов (таблица А.1)

№ экс- пери- мента	Размер частицы d, мм	$(w_{\text{ВИТ}} - \bar{w}_{\text{ВИТ}})^2$	$S_i^2$	$G_{\text{оп}}$	$S_e^2$	$(\bar{w}_{\text{ВИТ}} - \hat{w}_{\text{рч}})^2$	$S_{le}^2$
1	2	6	7	8	9	10	11
1	15	0,0053	0,004 2	0,417 8	0,280 5	0,00058	
2		0,0005					
3		0,0026					
1	10	0,0277	0,219 7				
2		0,1317					
3		0,2801					
1	7,5	0,4783	0,358 8				
2		0,1159					
3		0,1233					
1	5	0,2947	0,233 9				
2		0,0251					
3		0,14792					
1	2,5	0,2880	0,585 9				
2		0,1155					
3		0,7683					
			1,402 5			0,5803	0,8705

Таблица А.4 – Обработка результатов экспериментов (таблица А.2)

№ экс- пери- мента	Плотность частицы $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$(x - \bar{x})^2$	$S_i^2$	$G_{\text{оп}}$	$S_e^2$	$(\bar{y} - \hat{y})^2$	$S_{le}^2$
1	2	6	7	8	9	10	11
1	2300	1,6058	1,2584	0,4287	0,5871	0,2490	
2		0,1610					
3		0,7499					
1	2200	1,5216	1,1488				
2		0,4955					
3		0,2805					
1	1500	0,2631	0,2259				
2		0,1813					
3		0,0076					
1	800	0,0908	0,0685				
2		0,0291					
3		0,0171					
1	400	0,2947	0,2339				
2		0,0251					
3		0,1479ъ					
			2,9355			0,8331	1,2496

Таблица А.5

## Результаты экспериментальных исследований опытной установки

№ эксперимента	Размер частицы $d$ , мм	Плотность частицы $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Концентрация частиц $\mu$ , кг/кг	Диаметр трубопровода $D$ , мм	Показания микроманометра $l$ , мм	Угол наклона шкалы, $k_n$	Статическое давление $P_{ст}$ , Па	Расход воздуха $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	Скорость витания эксперимента, $w_{вит}$ , м/с	Скорость витания расчетная, $w_{рч}$ , м/с, [2.10]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2,5	400	0,116	119	34	0,2	66,64	0,081	7,27	7,3
2		400	0,198	122	32	0,2	62,72	0,079	6,78	7,00
3		400	0,231	119	28	0,2	54,88	0,074	6,60	6,88
4		400	0,364	118	24	0,2	50,1	0,071	5,90	6,4
5		400	0,578	119	20	0,2	39,2	0,062	5,58	5,63
1	5	400	0,083	119	57	0,2	111,7	0,105	9,56	9,71
2		400	0,165	118	50	0,2	98	0,098	9,01	9,32
3		400	0,215	122	55	0,2	107,8	0,104	8,89	9,09
4		400	0,248	118	47	0,2	92,12	0,096	8,83	8,93
5		400	0,314	120	48	0,2	94,08	0,097	8,3	8,62
6		400	0,331	110	45	0,2	88,2	0,094	8,37	8,5
1	10	400	0,264	124	122	0,2	239,1	0,154	12,73	13,03
2		400	0,463	124	99	0,2	192,1	0,138	11,47	11,64
3		400	0,744	123	77	0,2	150,9	0,123	10,31	9,67
4		400	1,041	122	42	0,2	82,32	0,090	7,77	7,58
5		400	1,372	120	40	0,2	78,4	0,088	7,00	6,5
1	2,5	800	0,198	122	40	0,2	79	0,088	7,57	7,58
2		800	0,264	12,2	39	0,2	76,4	0,087	7,46	7,56

Продолжение таблицы А.5

3		800	0,347	12,18	38	0,2	74,5	0,086	7,39	7,54
4		800	0,496	12,17	37	0,2	72,5	0,085	7,30	7,51
5		800	0,545	121	36	0,2	70,56	0,084	7,23	7,50
1	5	800	0,330	123	66	0,2	129,4	0,113	9,55	9,56
2		800	0,462	122	61	0,2	119,6	0,109	9,30	9,38
3		800	0,545	120	59	0,2	115,6	0,107	9,18	9,27
4		800	0,661	120	58	0,2	113,7	0,106	9,11	9,11
5		800	0,793	119	55	0,2	107,8	0,103	8,90	8,93

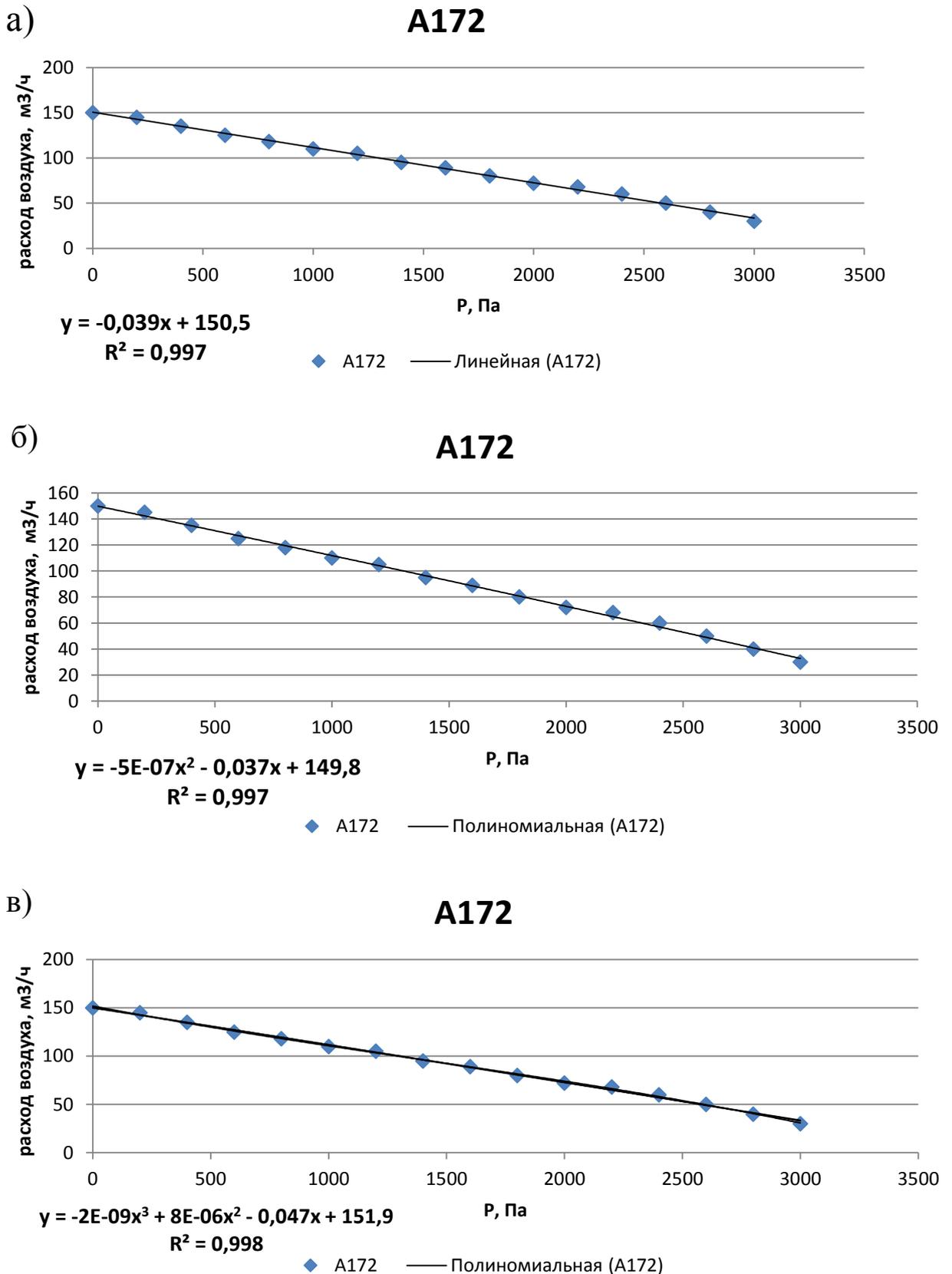
Таблица А.6.– Рекомендуемые скорости витания

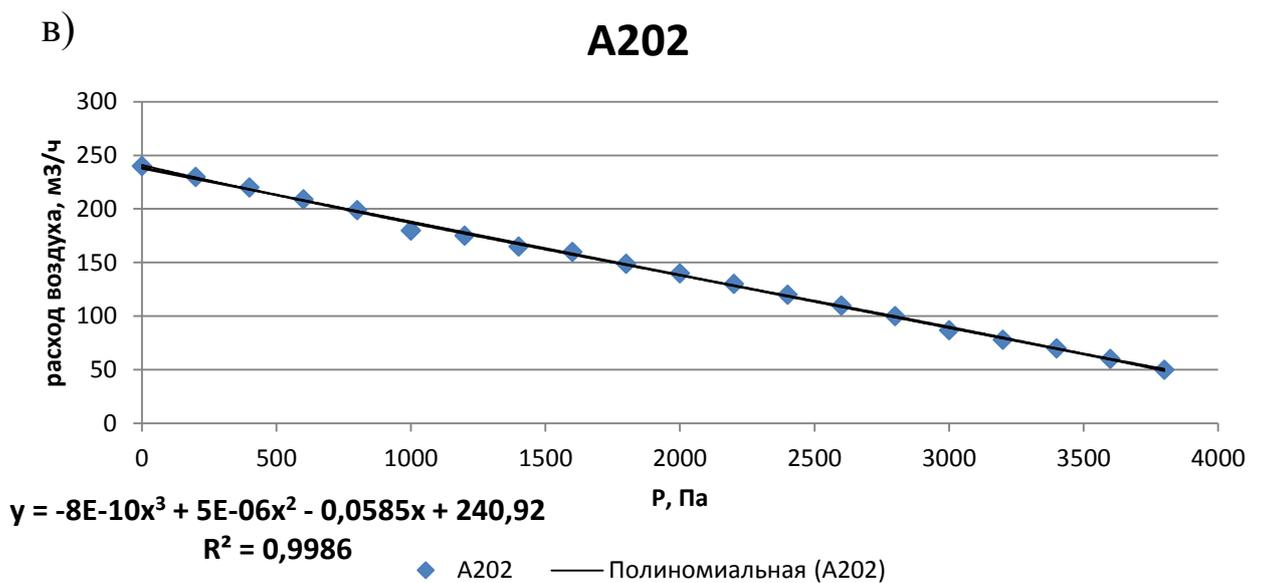
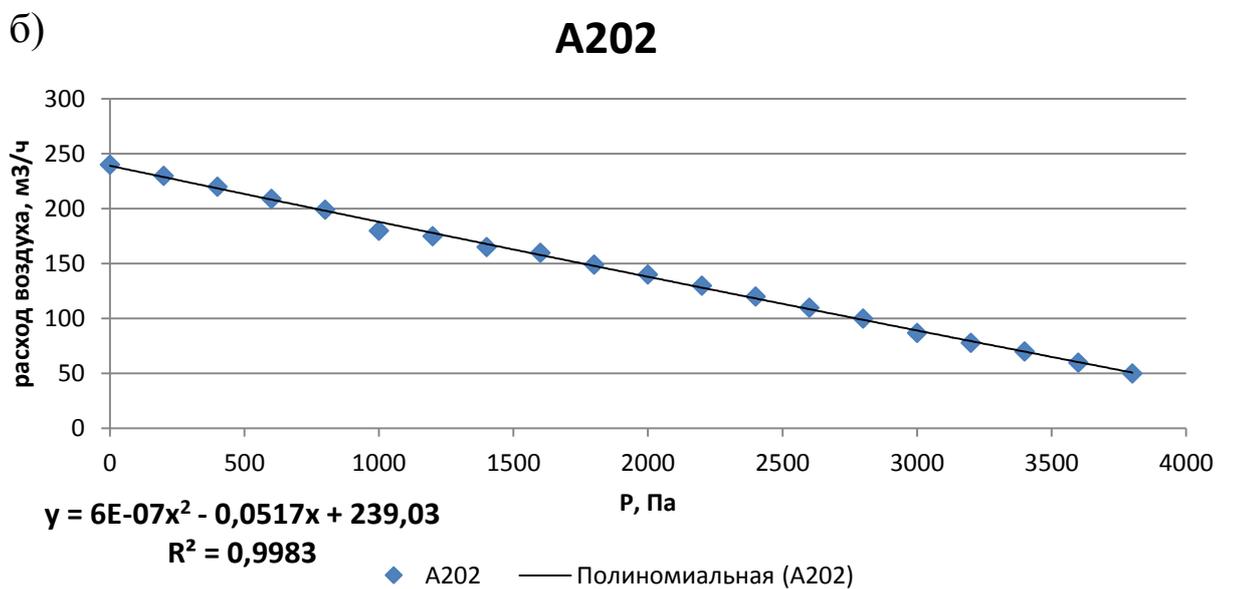
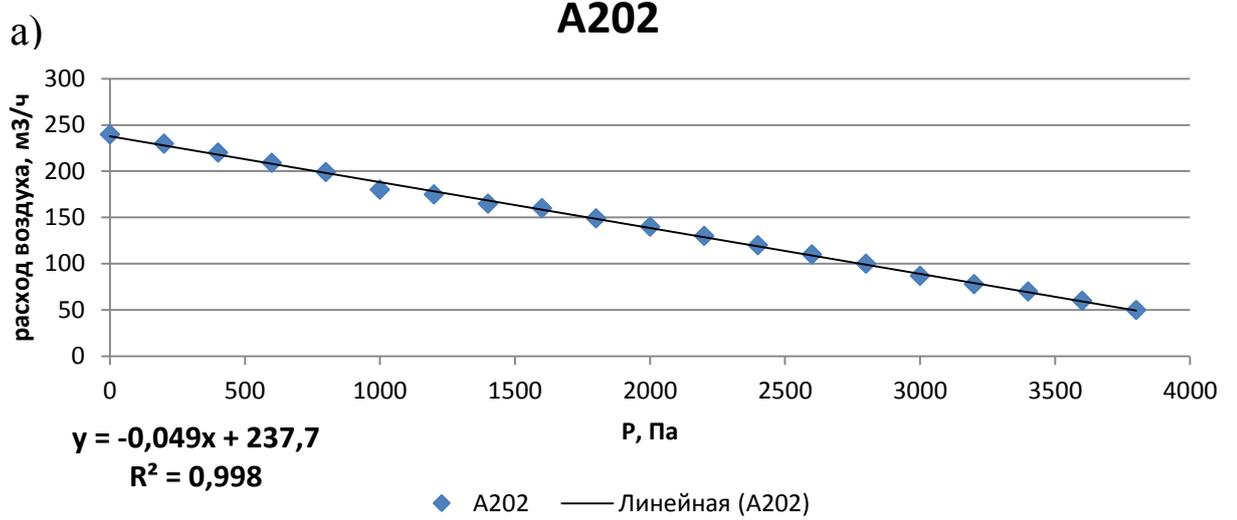
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$d$ , мм	$\mu$ , кг/кг										
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
200	2	6,55	6,27	5,77	5,26	4,75	4,24	3,74	3,23	2,72	2,21	
200	3	7,43	7,14	6,59	6,03	5,48	4,93	4,37	3,82	3,27	2,72	
200	4	8,31	8,00	7,41	6,81	6,21	5,61	5,01	4,41	3,82	3,22	
200	5	9,19	8,87	8,23	7,58	6,94	6,29	5,65	5,01	4,36	3,72	
200	6	10,07	9,73	9,05	8,36	7,67	6,98	6,29	5,60	4,91	4,22	
200	7	10,94	10,60	9,86	9,13	8,40	7,66	6,93	6,19	5,46	4,72	
200	8	11,82	11,46	10,86	9,90	9,12	8,35	7,57	6,79	6,01	5,23	
200	9	12,70	12,33	11,50	10,68	9,85	9,03	8,20	7,38	6,55	5,73	
200	10	13,58	13,19	12,32	11,45	10,85	9,71	8,84	7,97	7,10	6,23	
300	2	6,84	6,42	6,00	5,57	5,15	4,73	4,31	3,88	3,46	3,04	
300	3	7,75	7,28	6,82	6,35	5,88	5,41	4,94	4,48	4,01	3,54	
300	4	8,66	8,15	7,64	7,12	6,61	6,10	5,58	5,07	4,55	4,04	
300	5	9,57	9,01	8,46	7,90	7,34	6,78	6,22	5,66	5,10	4,54	
300	6	10,48	9,88	9,28	8,67	8,07	7,46	6,86	6,25	5,65	5,04	
300	7	11,39	10,74	10,10	9,45	8,80	8,15	7,50	6,85	6,20	5,55	
300	8	12,31	11,61	10,91	10,22	9,52	8,83	8,13	7,44	6,74	6,05	
300	9	13,22	12,48	11,73	10,99	10,25	9,51	8,77	8,03	7,29	6,55	
300	10	14,13	13,34	12,55	11,77	10,98	10,20	9,41	8,62	7,84	7,05	
400	2	-	6,56	6,23	5,89	5,55	5,21	4,87	4,54	4,20	3,86	
400	3	-	7,43	7,05	6,66	6,28	5,90	5,51	5,13	4,75	4,36	
400	4	-	8,30	7,87	7,44	7,01	6,58	6,15	5,72	5,29	4,86	
400	5	-	9,16	8,69	8,21	7,74	7,26	6,79	6,31	5,84	5,37	
400	6	-	10,03	9,51	8,99	8,47	7,95	7,43	6,91	6,39	5,87	
400	7	-	10,89	10,33	9,76	9,19	8,63	8,06	7,50	6,93	6,37	
400	8	-	11,76	11,15	10,53	9,92	9,31	8,70	8,09	7,48	6,87	
400	9	-	12,62	11,96	11,31	10,65	10,00	9,34	8,68	8,03	7,37	
400	10	-	13,49	12,78	12,08	11,38	10,68	9,98	9,28	8,58	7,87	
500	2	6,25	6,71	6,46	6,20	5,99	5,70	5,44	5,19	4,94	4,68	
500	3	7,01	7,58	7,28	6,98	6,68	6,38	6,08	5,78	5,48	5,18	
500	4	7,77	8,44	8,10	7,75	7,41	7,06	6,72	6,37	6,03	5,69	
500	5	8,54	9,31	8,92	8,53	8,14	7,75	7,36	6,97	6,58	6,19	
500	6	9,30	10,17	9,74	9,30	8,87	8,43	8,00	7,56	7,12	6,69	
500	7	10,07	11,04	10,56	10,08	9,59	9,11	8,63	8,15	7,67	7,19	
500	8	10,83	11,90	11,38	10,85	10,32	9,80	9,27	8,75	8,22	7,69	
500	9	11,59	12,77	12,20	11,62	11,05	10,48	9,91	9,34	8,77	8,20	
500	10	12,36	13,63	13,01	12,40	11,78	11,16	10,55	9,93	9,31	8,70	
600	2	-	6,86	6,69	6,52	6,35	6,18	6,01	5,84	5,67	5,51	
600	3	-	7,72	7,51	7,29	7,08	6,86	6,65	6,44	6,22	6,01	

Продолжение таблицы А.6

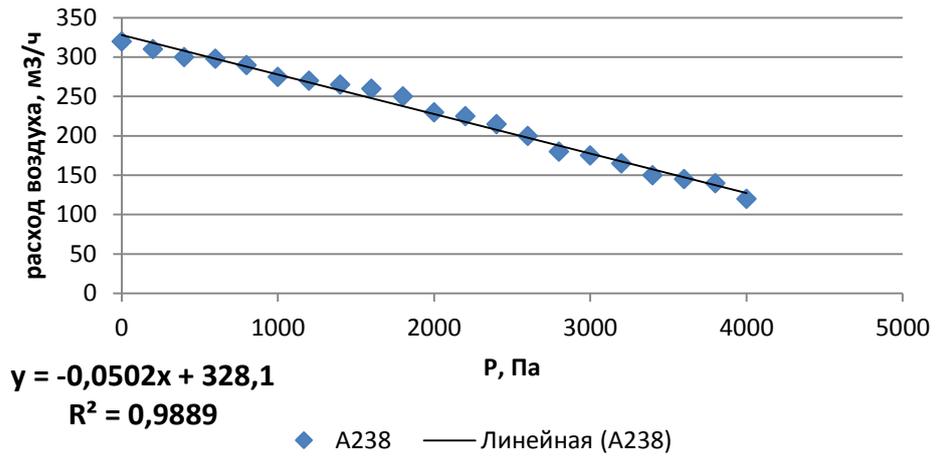
600	4	-	8,59	8,33	8,07	7,81	7,55	7,29	7,03	6,77	6,51
600	5	-	9,45	9,15	8,84	8,54	8,23	7,93	7,62	7,32	7,01
600	6	-	10,32	9,97	9,62	9,27	8,91	8,56	8,21	7,86	7,51
600	7	-	11,18	10,79	10,39	9,99	9,60	9,20	8,81	8,41	8,01
600	8	-	12,05	11,61	11,16	10,72	10,28	9,84	9,40	8,96	8,52
600	9	-	12,91	12,43	11,94	11,45	10,97	10,48	9,99	9,50	9,02
600	10	-	13,78	13,25	12,71	12,18	11,65	11,12	10,58	10,05	9,52
700	2	7,09	7,00	6,92	6,83	6,75	6,66	6,58	6,50	6,41	6,33
700	3	8,00	7,87	7,74	7,61	7,48	7,35	7,22	7,09	6,96	6,83
700	4	8,91	8,73	8,56	8,38	8,21	8,03	7,86	7,68	7,51	7,33
700	5	9,82	9,60	9,38	9,16	8,94	8,72	8,49	8,27	8,05	7,83
700	6	10,73	10,46	10,20	9,93	9,66	9,40	9,13	8,87	8,60	8,34
700	7	11,64	11,33	11,02	10,70	10,39	10,08	9,77	9,46	9,15	8,84
700	8	12,55	12,19	11,84	11,48	11,12	10,77	10,41	10,05	9,70	9,34
700	9	13,46	13,06	12,66	12,25	11,85	11,45	11,05	10,65	10,24	9,84
700	10	14,37	13,92	13,48	13,03	12,58	12,13	11,69	11,24	10,79	10,34
800	2	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15
800	3	8,06	8,01	7,97	7,92	7,88	7,83	7,79	7,74	7,70	7,65
800	4	8,97	8,88	8,79	8,70	8,61	8,52	8,43	8,33	8,24	8,15
800	5	9,88	9,74	9,61	9,47	9,34	9,20	9,06	8,93	8,79	8,66
800	6	10,79	10,61	10,43	10,25	10,06	9,88	9,70	9,52	9,34	9,16
800	7	11,70	11,47	11,25	11,02	10,79	10,57	10,34	10,11	9,89	9,66
800	8	12,61	12,34	12,07	11,79	11,52	11,25	10,98	10,71	10,43	10,16
800	9	13,52	13,20	12,89	12,57	12,25	11,93	11,62	11,30	10,98	10,66
800	10	14,43	14,07	13,71	13,34	12,98	12,62	12,25	11,89	11,53	11,17
900	4	9,03	9,02	9,02	9,01	9,01	9,00	8,99	8,99	8,98	8,98
900	5	9,94	9,89	9,84	9,79	9,73	9,68	9,63	9,58	9,53	9,48
900	6	10,85	10,75	10,66	10,56	10,46	10,37	10,27	10,17	10,08	9,98
900	7	11,76	11,62	11,48	11,33	11,19	11,05	10,91	10,77	10,62	10,48
900	8	12,67	12,48	12,30	12,11	11,92	11,73	11,55	11,36	11,17	10,98
900	9	13,58	13,35	13,12	12,88	12,65	12,42	12,18	11,95	11,72	11,49
900	10	14,49	14,21	13,94	13,66	13,38	13,10	12,82	12,54	12,27	11,99

Зависимости расхода воздуха от давления, описываемые полиномами а) линейное; б) полином 2-й степени; в) полином 3-й степени  
Вихревые насосы:

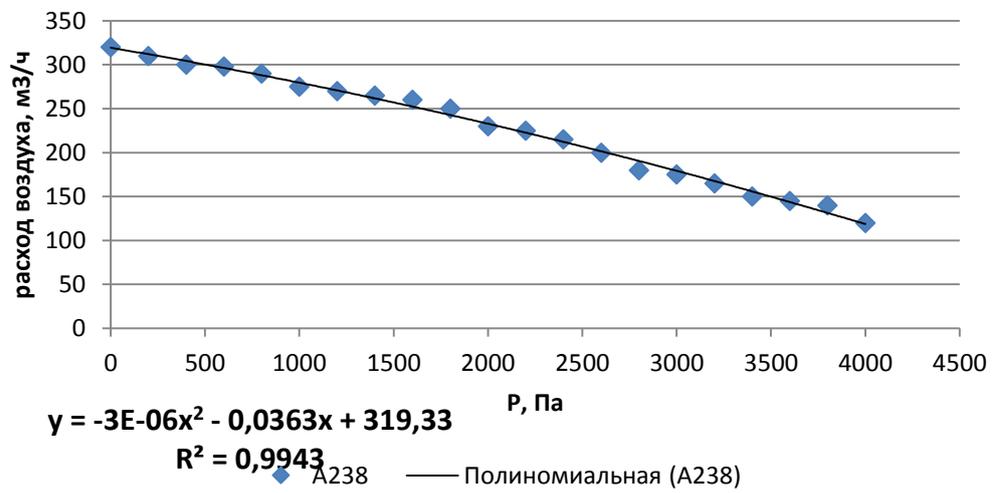




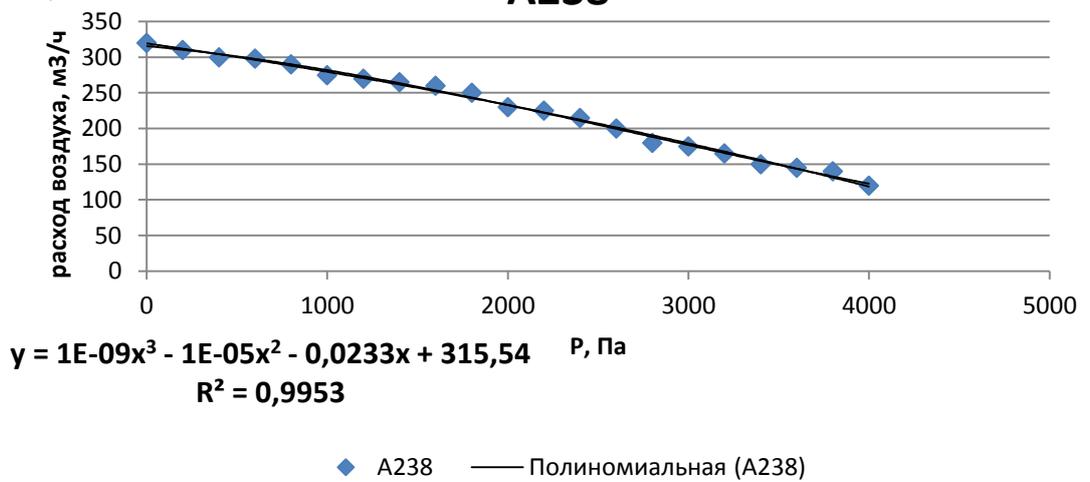
а)

**A238**

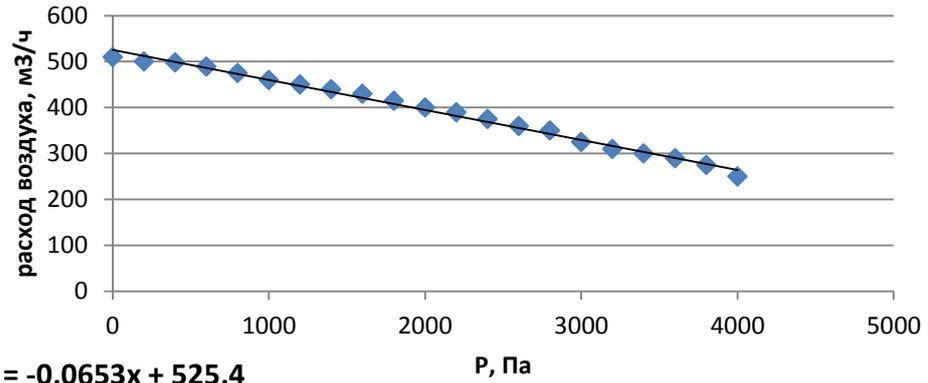
б)

**A238**

в)

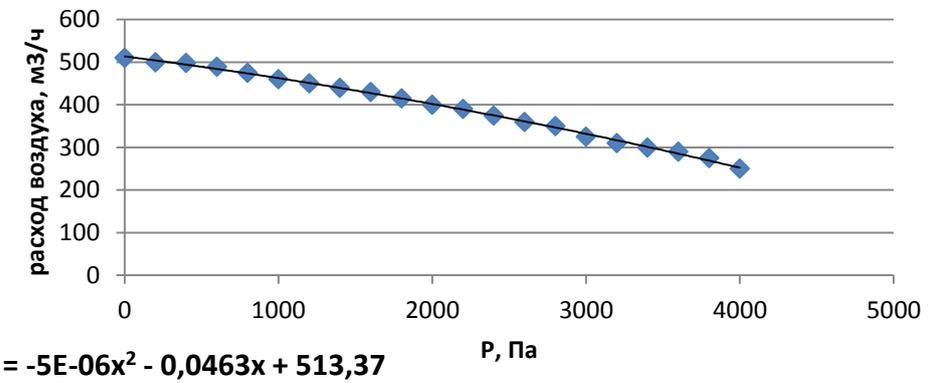
**A238**

а)

**A286**

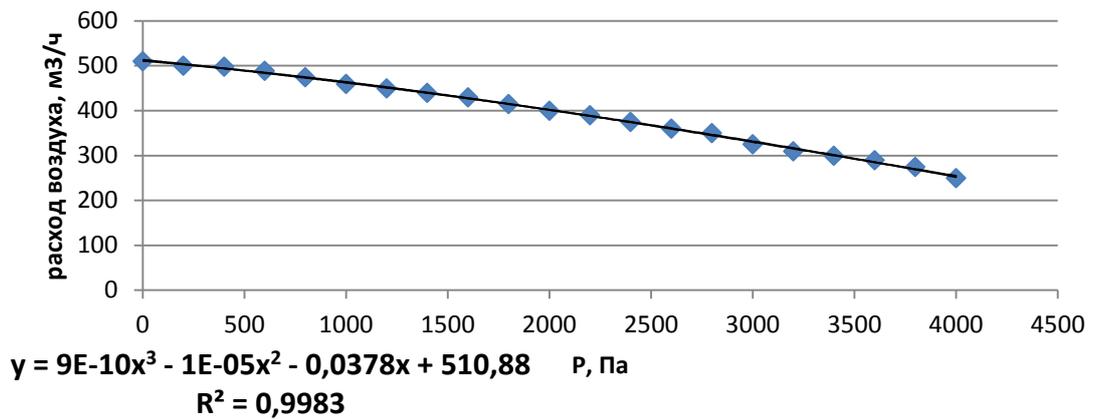
◆ A286 — Линейная (A286)

б)

**A286**

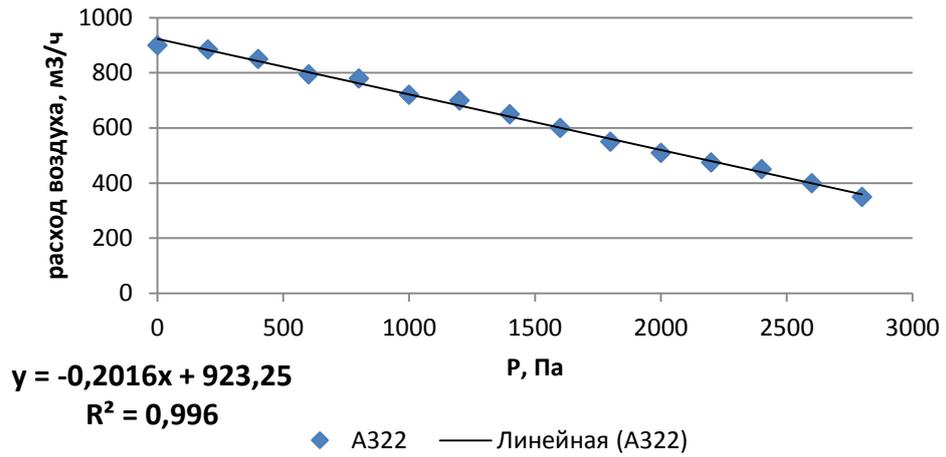
◆ A286 — Полиномиальная (A286)

в)

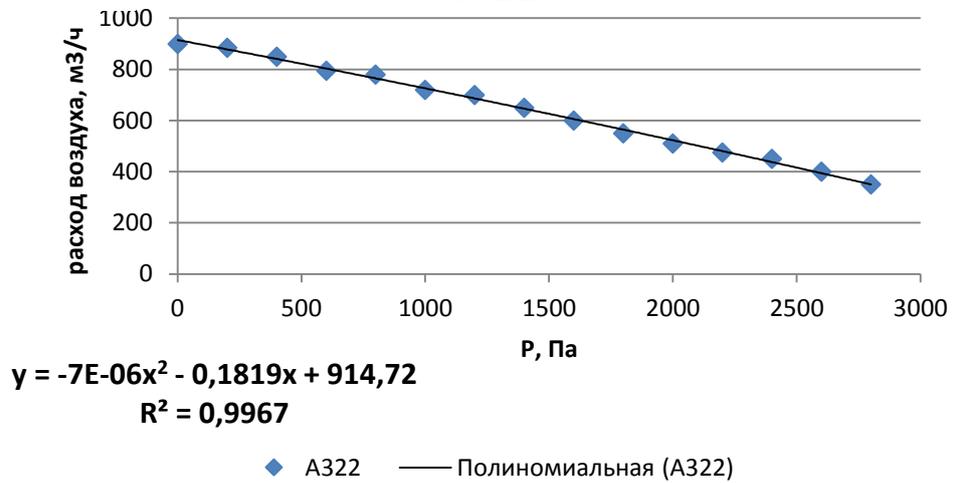
**A286**

◆ A286 — Полиномиальная (A286)

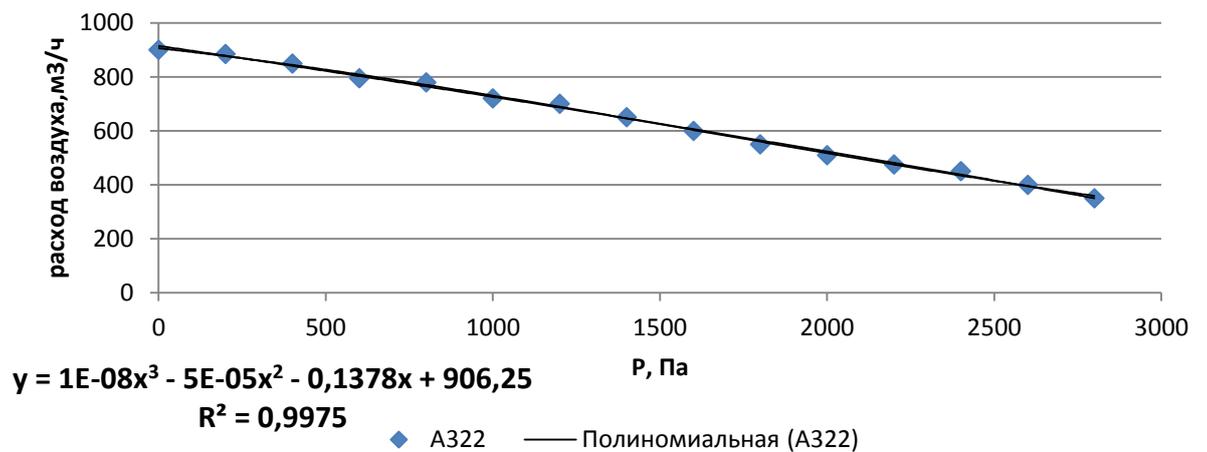
а)

**A322**

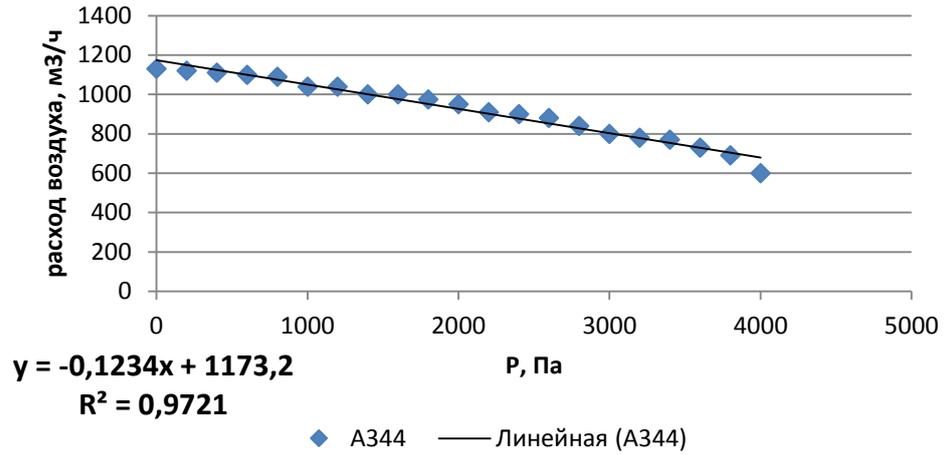
б)

**A322**

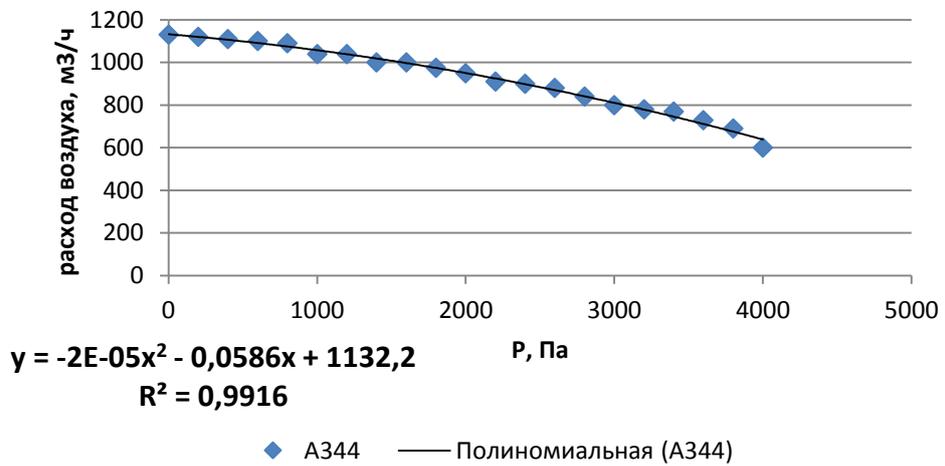
в)

**A322**

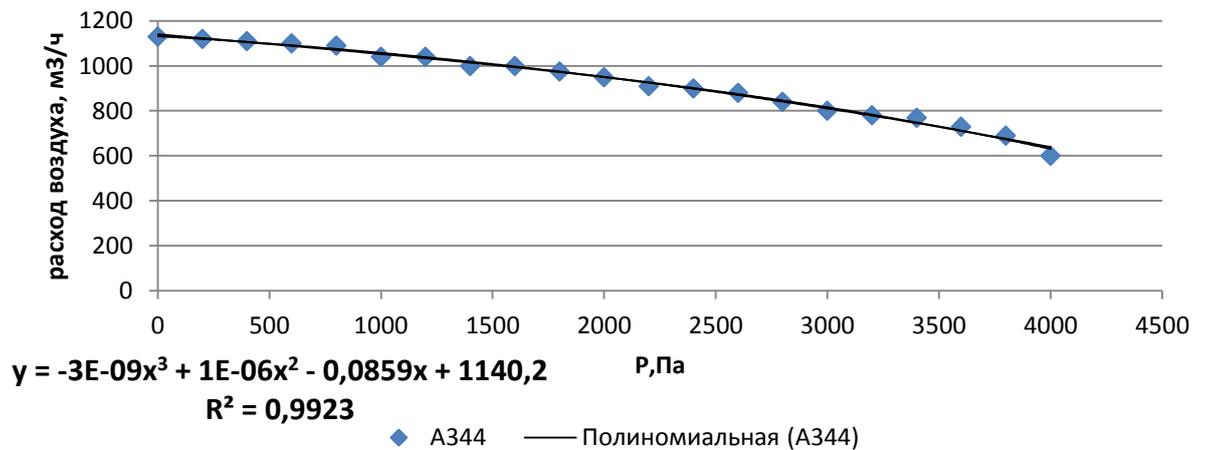
a)

**A344**

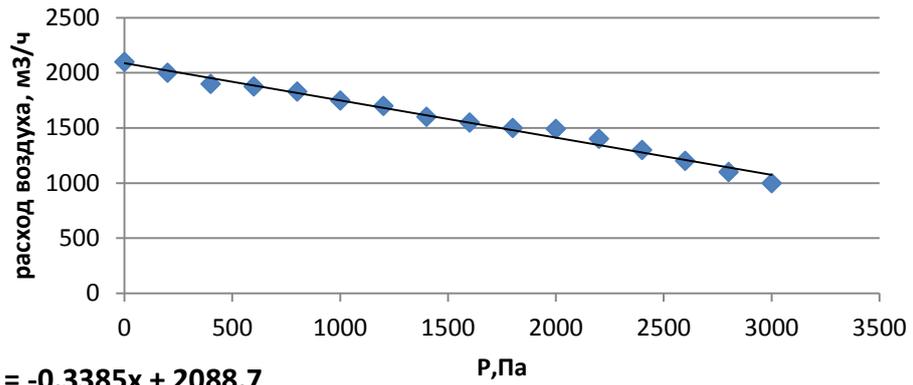
б)

**A344**

в)

**A344**

а)

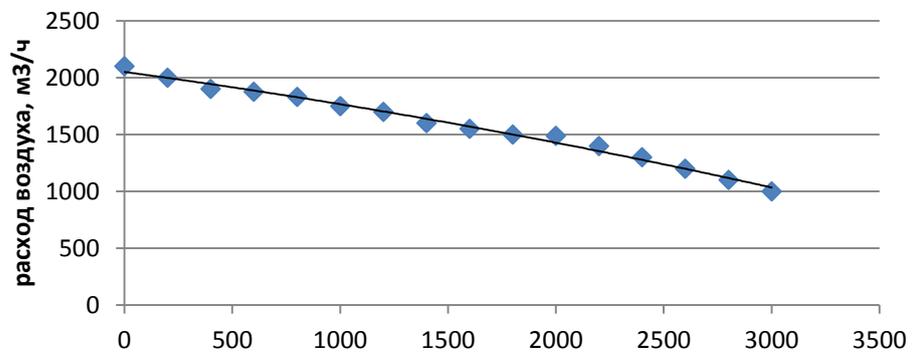
**A384**

$$y = -0,3385x + 2088,7$$

$$R^2 = 0,9864$$

◆ A384 — Линейная (A384)

б)

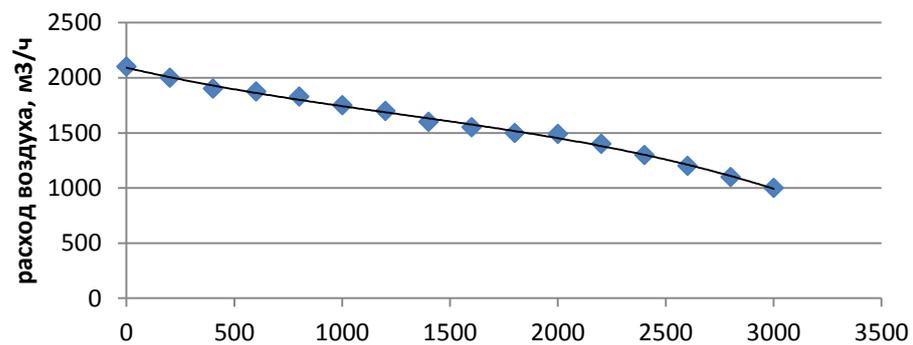
**A384**

$$y = -3E-05x^2 - 0,2558x + 2050,1$$

$$R^2 = 0,9907$$

◆ A384 — Полиномиальная (A384)

в)

**A384**

$$y = -4E-08x^3 + 0,0001x^2 - 0,4536x + 2091,4$$

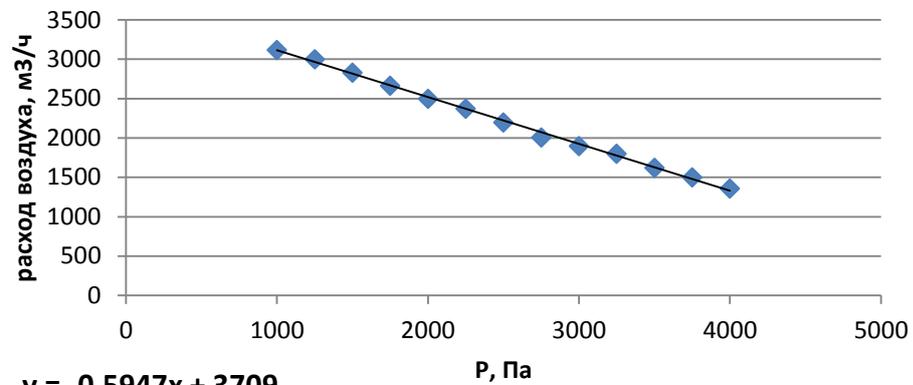
$$R^2 = 0,996$$

◆ A384 — Полиномиальная (A384)

## Роторные насосы:

а)

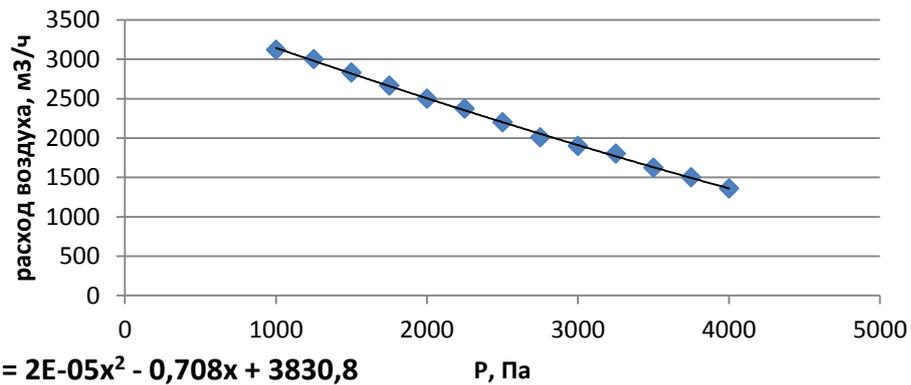
H55



◆ H55 — Линейная (H55)

б)

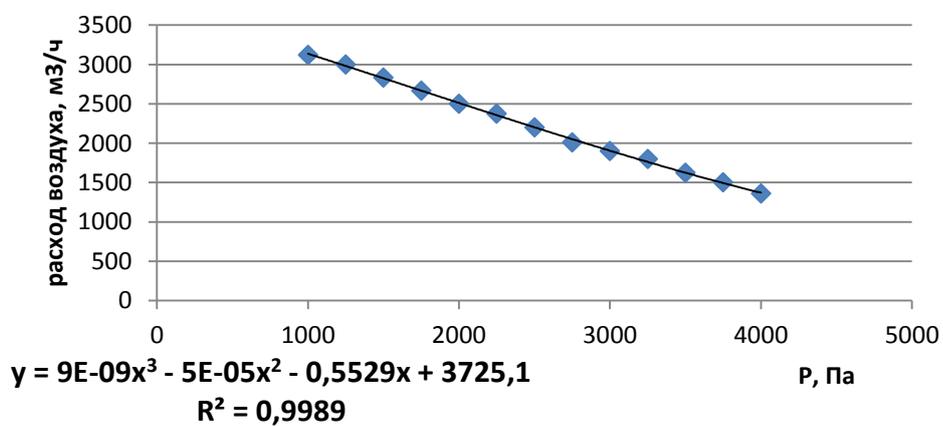
H55



◆ H55 — Полиномиальная (H55)

в)

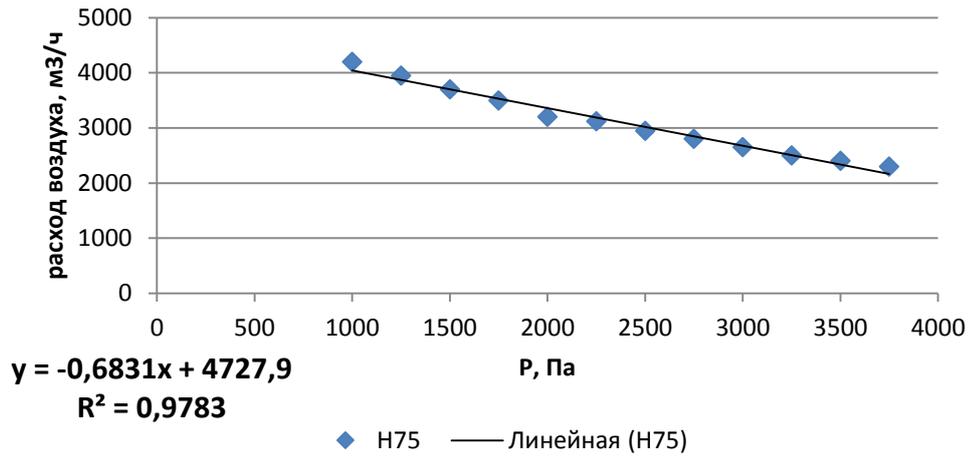
H55



◆ H55 — Полиномиальная (H55)

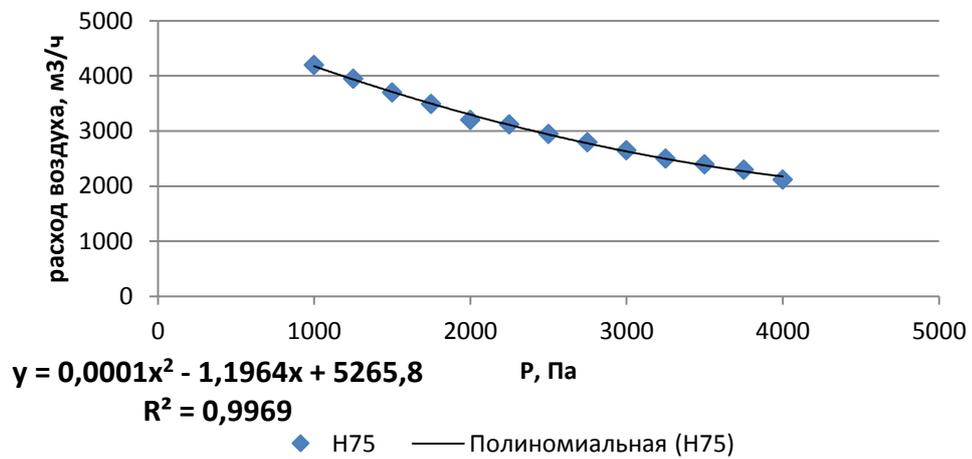
а)

Н75



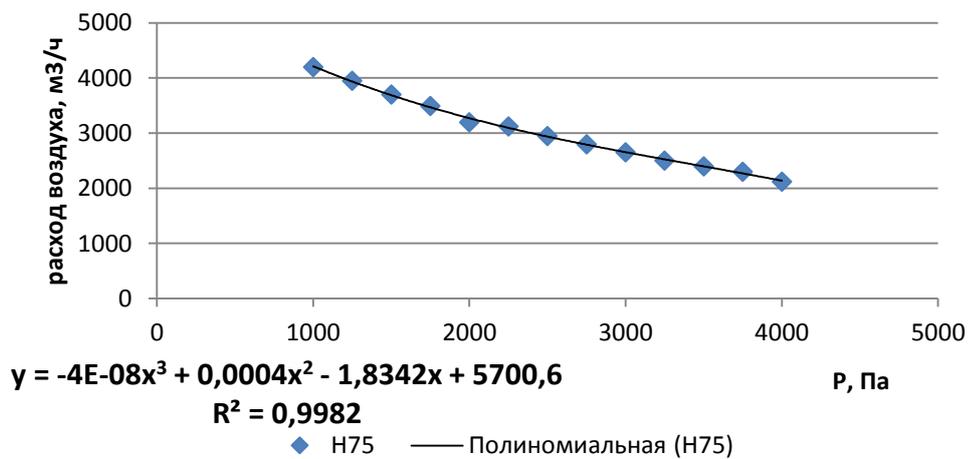
б)

Н75

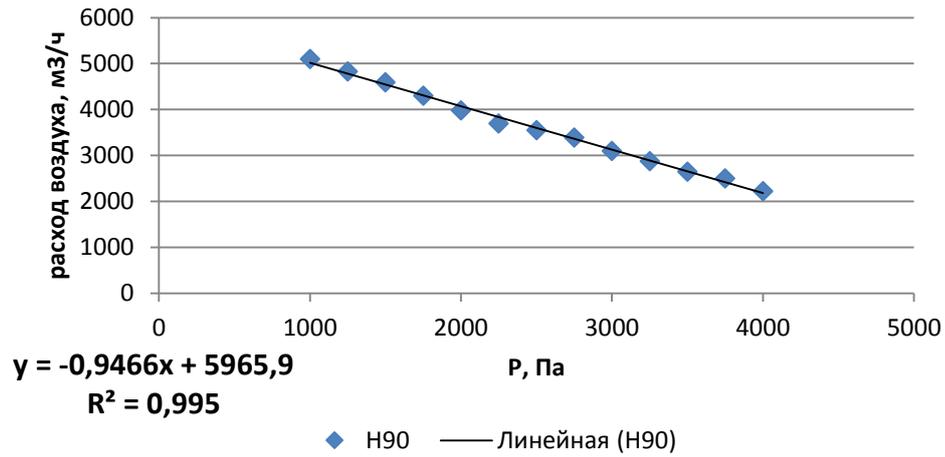


в)

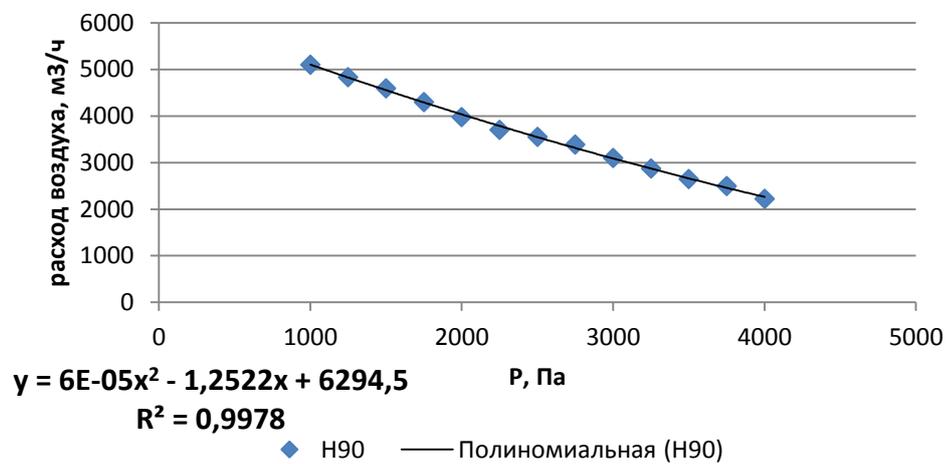
Н75



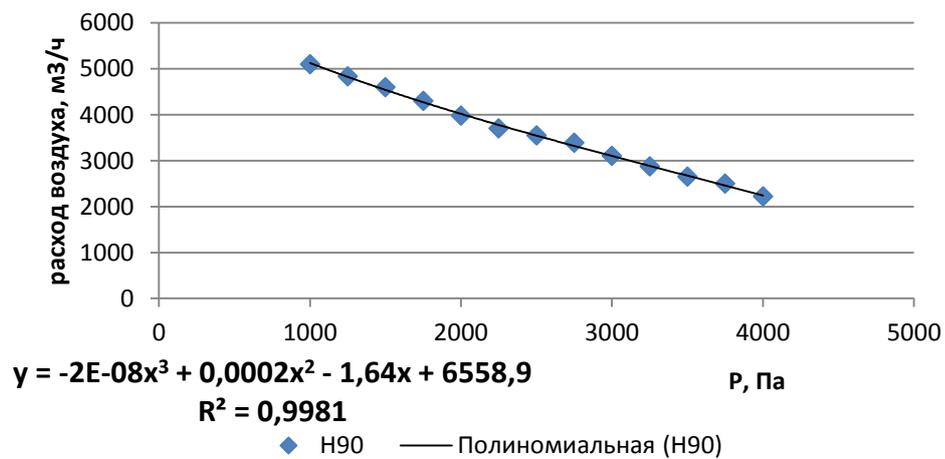
а)

**H90**

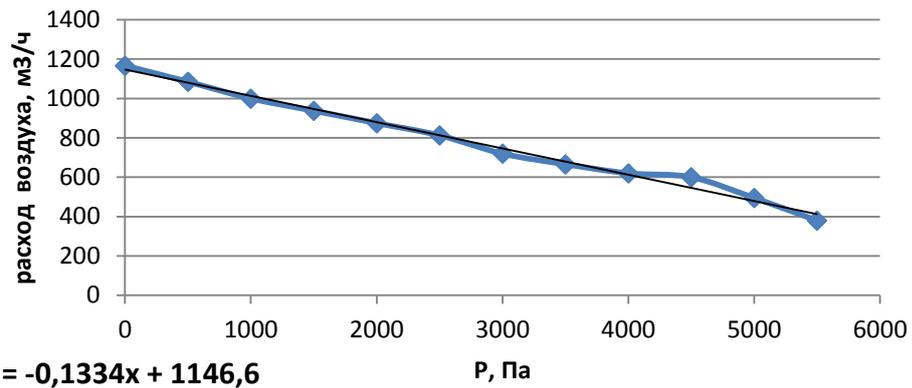
б)

**H90**

в)

**H90**

а)

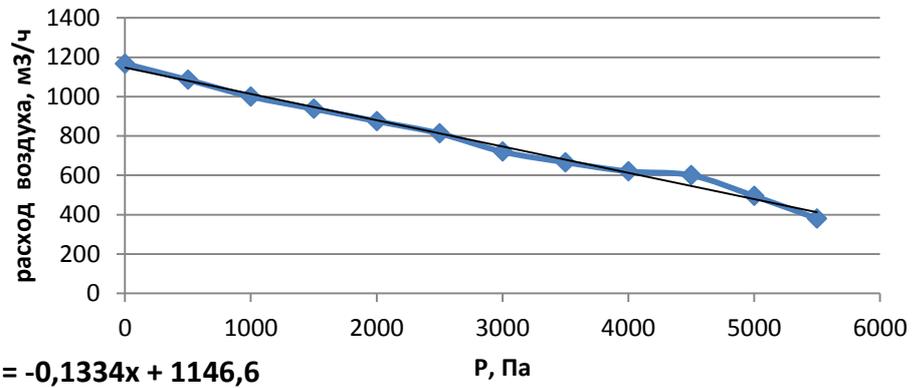
**KS-220P**

$$y = -0,1334x + 1146,6$$

$$R^2 = 0,9909$$

—◆— KS-220P — Линейная (KS-220P)

б)

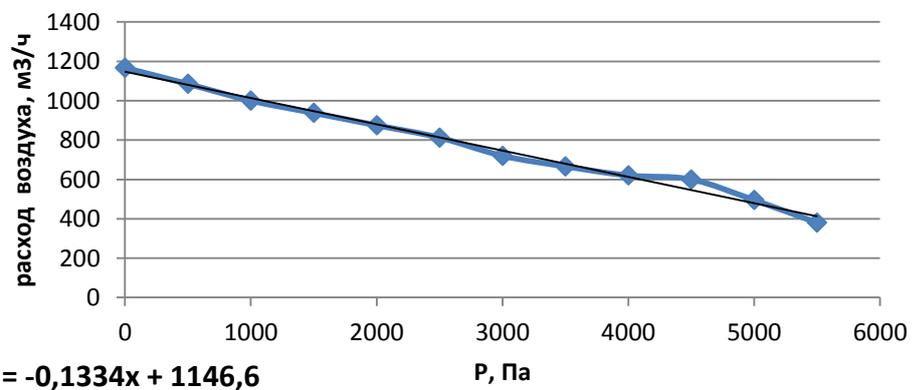
**KS-220P**

$$y = -0,1334x + 1146,6$$

$$R^2 = 0,9909$$

—◆— KS-220P — Линейная (KS-220P)

в)

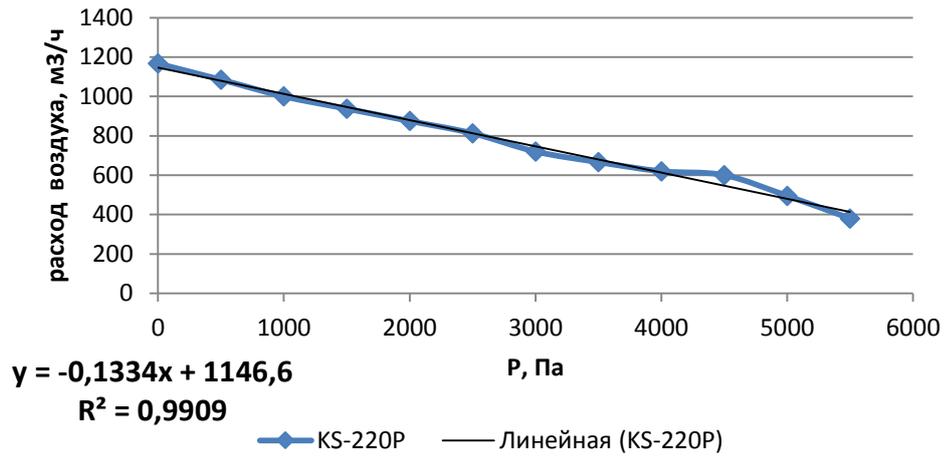
**KS-220P**

$$y = -0,1334x + 1146,6$$

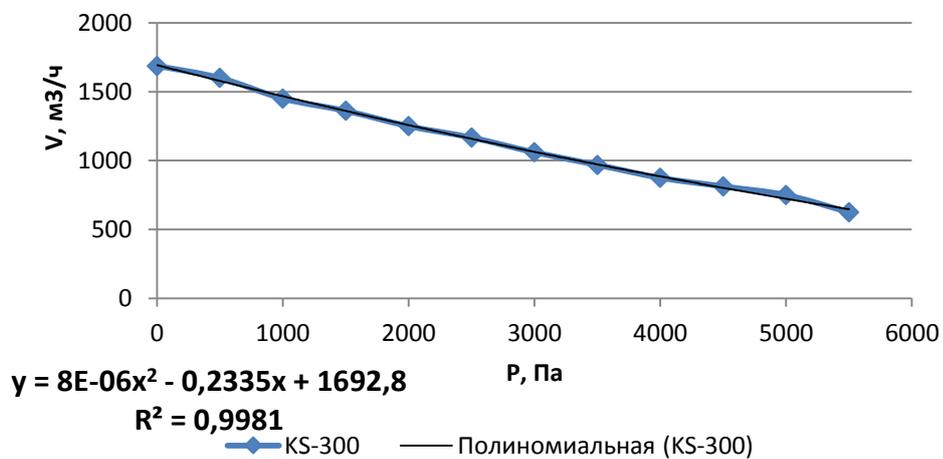
$$R^2 = 0,9909$$

—◆— KS-220P — Линейная (KS-220P)

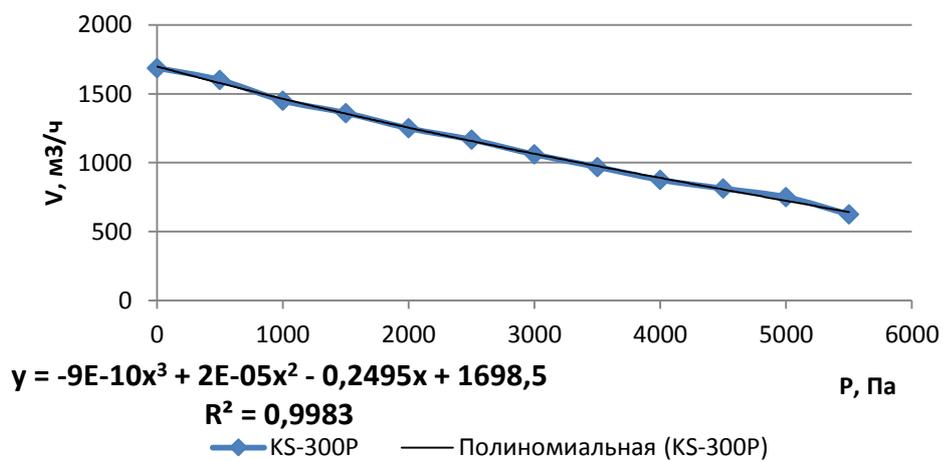
а)

**KS-220P**

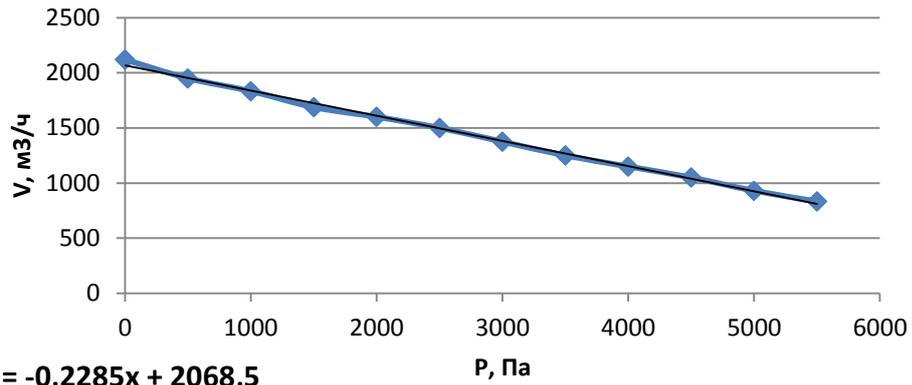
б)

**KS-300**

в)

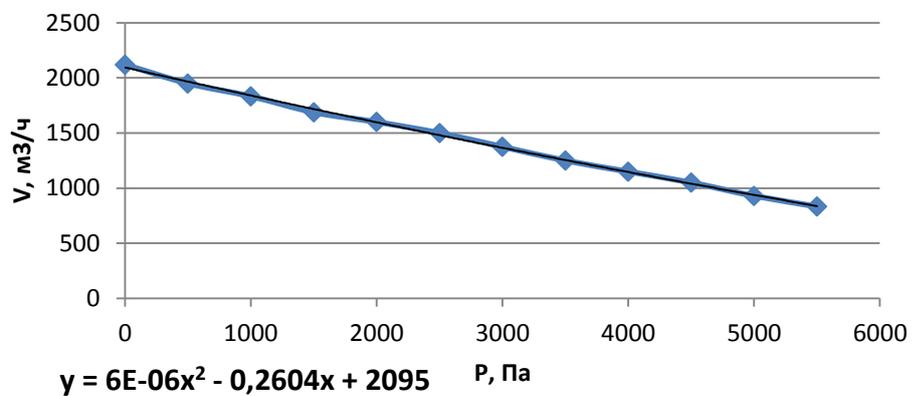
**KS-300P**

a)

**KS-370P**

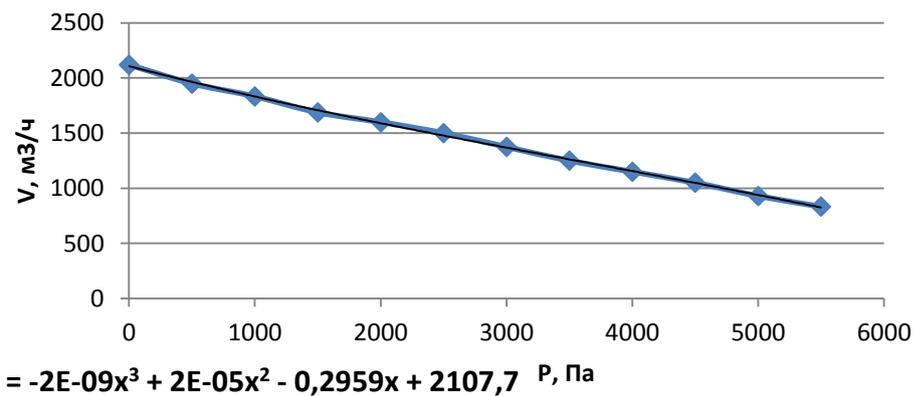
—◆— KS-370P    — Линейная (KS-370P)

б)

**KS-370-P**

—◆— KS-370-P    — Полиномиальная (KS-370-P)

в)

**KS-370P**

—◆— KS-370P    — Полиномиальная (KS-370P)

### Результаты расчетов по программе для ЭВМ РФ № 2015619490

P, Па	Расходы воздуха V, м <sup>3</sup> /ч							
	А172				А 202			
	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.
0	150	150,52	149,8	151,91	240	237,77	239,03	240,92
200	145	142,72	142,28	142,69	230	227,85	228,71	229,41
400	135	134,92	134,72	134,02	220	217,93	218,45	218,27
600	125	127,12	127,12	125,80	109	208,01	208,23	207,45
800	118	119,32	119,48	117,93	199	198,09	198,05	196,91
1000	110	111,52	111,8	110,31	180	188,17	187,93	186,62
1200	105	103,72	104,08	102,85	175	178,25	177,85	176,54
1400	95	95,92	96,32	95,46	165	168,33	167,83	166,62
1600	89	88,12	88,52	88,04	160	158,41	157,85	156,84
1800	80	80,32	80,68	80,49	149	148,49	147,91	147,15
2000	72	72,52	72,8	72,71	140	138,57	138,03	137,52
2200	68	64,72	64,88	64,61	130	128,65	128,19	127,90
2400	60	56,92	56,92	56,10	120	118,73	118,41	118,26
2600	50	49,12	48,92	47,08	110	108,81	108,67	108,56
2800	40	41,32	40,88	37,45	100	98,89	98,97	98,76
3000	30	33,52	32,8	27,11	87	88,97	89,33	88,82
3200					78	79,05	79,73	78,71
3400					70	69,13	70,19	68,38
3600					60	59,21	60,69	57,80
3800					50	49,29	51,23	46,92

Продолжение таблицы Б.1

Р, Па	Расходы воздуха V, м <sup>3</sup> /ч							
	А238				А 286			
	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.
0	320	328,1	319,33	315,54	510	525,4	513,37	510,88
200	310	318,06	311,95	310,49	500	512,34	503,91	502,93
400	300	308,02	304,33	304,68	498	499,28	494,05	494,22
600	298	297,98	296,47	298,18	489	486,22	483,79	484,79
800	290	287,94	288,37	291,01	475	473,16	473,13	473,13
1000	275	277,9	280,03	283,24	460	460,1	462,07	462,07
1200	270	267,86	271,45	274,91	450	447,04	450,61	450,61
1400	265	257,82	262,63	266,06	440	433,98	438,75	438,75
1600	260	247,78	253,57	256,76	430	420,92	426,49	426,49
1800	250	237,74	244,27	247,03	415	407,86	413,83	413,83
2000	230	227,7	234,73	236,94	400	394,8	400,77	400,77
2200	225	217,66	224,95	226,53	390	381,74	387,31	387,31
2400	215	207,62	214,93	215,84	375	368,68	373,45	373,45
2600	200	197,58	204,67	204,94	360	355,62	359,19	359,19
2800	180	187,54	194,17	193,85	350	342,56	344,53	344,53
3000	175	177,5	183,43	182,64	325	329,5	329,47	329,47
3200	165	167,46	172,45	171,35	310	316,44	314,01	314,01
3400	150	157,42	161,23	160,02	300	303,38	298,15	298,15
3600	145	147,38	149,77	148,72	290	290,32	281,89	281,89
3800	140	137,34	138,07	137,47	275	277,26	265,23	265,23
4000	120	127,3	126,13	126,34	250	264,2	248,17	248,17

Р, Па	Расходы воздуха V, м <sup>3</sup> /ч							
	А238				А 286			
	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.
0	320	328,1	319,33	315,54	510	525,4	513,37	510,88
200	310	318,06	311,95	310,49	500	512,34	503,91	502,93
400	300	308,02	304,33	304,68	498	499,28	494,05	494,22
600	298	297,98	296,47	298,18	489	486,22	483,79	484,79
800	290	287,94	288,37	291,01	475	473,16	473,13	473,13
1000	275	277,9	280,03	283,24	460	460,1	462,07	462,07
1200	270	267,86	271,45	274,91	450	447,04	450,61	450,61
1400	265	257,82	262,63	266,06	440	433,98	438,75	438,75
1600	260	247,78	253,57	256,76	430	420,92	426,49	426,49
1800	250	237,74	244,27	247,03	415	407,86	413,83	413,83
2000	230	227,7	234,73	236,94	400	394,8	400,77	400,77
2200	225	217,66	224,95	226,53	390	381,74	387,31	387,31
2400	215	207,62	214,93	215,84	375	368,68	373,45	373,45
2600	200	197,58	204,67	204,94	360	355,62	359,19	359,19
2800	180	187,54	194,17	193,85	350	342,56	344,53	344,53
3000	175	177,5	183,43	182,64	325	329,5	329,47	329,47
3200	165	167,46	172,45	171,35	310	316,44	314,01	314,01
3400	150	157,42	161,23	160,02	300	303,38	298,15	298,15
3600	145	147,38	149,77	148,72	290	290,32	281,89	281,89
3800	140	137,34	138,07	137,47	275	277,26	265,23	265,23
4000	120	127,3	126,13	126,34	250	264,2	248,17	248,17

Р, Па	Расходы воздуха V, м <sup>3</sup> /ч							
	А 322				А 344			
	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.
0	900	923,25	914,72	906,25	1130	1173,2	1132,2	1140,20
200	885	882,93	878,06	876,77	1120	1148,52	1119,68	1123,04
400	850	842,61	840,84	843,77	1110	1123,84	1105,56	1105,81
600	795	802,29	803,06	807,73	1100	1099,16	1089,84	1088,37
800	780	761,97	764,72	769,13	1090	1074,48	1072,52	1070,58
1000	720	721,65	725,82	728,45	1040	1049,8	1053,6	1052,30
1200	700	681,33	686,36	686,17	1040	1025,12	1033,08	1033,38
1400	650	641,01	646,34	642,77	1000	1000,44	1010,96	1013,67
1600	600	600,69	605,76	598,73	100	975,76	987,24	993,03
1800	550	560,37	564,62	554,53	975	951,08	961,92	971,32
2000	510	520,05	522,92	510,65	950	926,4	935	948,40
2200	475	479,73	480,66	467,57	910	901,72	906,48	924,12
2400	450	439,41	437,84	425,77	900	877,04	876,36	898,33
2600	400	399,09	394,46	385,73	880	852,36	844,64	870,89
2800	350	358,77	350,52	347,93	840	827,68	811,32	841,66
3000					800	803	775,4	810,50
3200					780	778,32	739,88	777,26
3400					770	753,64	701,76	741,79
3600					730	728,96	662,04	703,95
3800					690	704,28	620,72	663,60
4000					600	679,6	577,8	620,60

## Продолжение таблицы Б.1

Р, Па	Расходы воздуха V, м <sup>3</sup> /ч			
	А384			
	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.
0	2100	2088,7	2050,1	2091,4
200	2000	2021	1997,74	2004,36
400	1900	1953,3	1942,98	1923,4
600	1875	1885,6	1885,82	1846,6
800	1830	1817,9	1826,26	1772,04
1000	1750	1750,2	1764,3	1697,8
1200	1700	1682,5	1699,94	1621,96
1400	1600	1614,8	1633,18	1542,6
1600	1550	1547,1	1564,02	1457,8
1800	1500	1479,4	1492,46	1365,64
2000	1490	1411,7	1418,5	1264,2
2200	1400	1344	1342,14	1151,56
2400	1300	1276,3	1263,38	1025,8
2600	1200	1208,6	1182,22	885
2800	1100	1140,9	1098,66	727,24
3000	1000	1073,2	1012,7	550,6

Р, Па	Расходы воздуха V, м <sup>3</sup> /ч											
	Н 55				Н 75				Н 90			
	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.
1000	3120	3114,30	3142,8	3131,20	4200	4029,70	4169,4	4226,4	5100	5019,3	5102,3	5098,90
1250	3000	2965,63	2977,05	2973,43	3950	3863,03	3926,55	3954,73	4833	4782,65	4823	4782,34
1500	2833	2816,95	2813,8	2813,63	3700	3696,35	3696,2	3714,30	4595	4546	4551,2	4481,40
1750	2667	2668,28	2653,05	2652,63	3495	3529,68	3478,35	3501,38	4300	4309,35	4286,9	4194,21
2000	2500	2519,60	2494,8	2491,30	3200	3363,00	3273	3312,20	3980	4072,7	4030,1	3918,90
2250	2375	2370,93	2339,05	2330,47	3120	3196,33	3080,15	3143,03	3700	3836,05	3780,8	3653,59
2500	2200	2222,25	2185,8	2170,98	2950	3029,65	2899,8	2990,10	3550	3599,4	3539	3396,40
2750	2010	2073,58	2035,05	2013,67	2800	2862,98	2731,95	2849,68	3390	3362,75	3304,7	3145,46
3000	1900	1924,90	1886,8	1859,40	2650	2696,30	2576,6	2718,00	3100	3126,1	3077,9	2898,90
3250	1800	1776,23	1741,05	1709,00	2500	2529,63	2433,75	2591,33	2875	2889,45	2858,6	2654,84
3500	1625	1627,55	1597,8	1563,33	2400	2362,95	2303,4	2465,90	2650	2652,8	2646,8	2411,40
3750	1500	1478,88	1457,05	1423,21	2300	2196,28	2185,55	32337,98	2500	2416,15	2442,5	2166,71
4000	1360	1330,20	1318,8	1289,50	2120	2029,60	2203,2	2203,80	2220	2179,5	2245,7	1918,90

Р, Па	Расходы воздуха V, м <sup>3</sup> /ч											
	KS-220P				KS-300P				KS-370P			
	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.	[133]	по линейной зависимости	по полиному 2-й ст.	по полиному 3-й ст.
0	1167	1146,6	1153	1173,8	1687,5	1656,6	1692,8	1698,5	2120	2068,5	2095	2107,7
500	1085	1079,9	1082,75	1081,23	1600	1561,55	1578,05	1578,64	1950	1954,25	1966,3	1964,5
1000	1000	1013,2	1013	1001,4	1450	1466,5	1467,3	1468,1	1833,3	1840	1840,6	1829,8
1500	937,5	946,5	943,75	932,1	1361	1371,45	1360,55	1366,2	1688	1725,75	1717,9	1702,1
2000	875	879,8	875	871	1250	1276,4	1257,8	1272,3	1600	1611,5	1598,2	1579,9
2500	812,5	813,1	806,75	815,93	1166,7	1181,35	1159,05	1185,68	1500	1497,25	1481,5	1461,7
3000	720	746,4	739	764,6	1060	1086,3	1064,3	1105,7	1375	1383	1367,8	1346
3500	666	679,7	671,75	714,78	968,75	991,25	973,55	1063,66	1250	1268,75	1257,1	1231,3
4000	620	613	605	664,2	875	896,2	868,8	962,9	1150	1154,5	1149,4	1116,1
4500	600	546,3	538,75	610,63	812,5	801,15	804,05	898,74	1050	1040,25	1044,7	998,9
5000	495	479,6	473	551,8	750	706,1	725,3	838,5	930	926	934	878,2
5500	380	412,9	407,75	485,48	625	611,05	650,55	781,51	833,3	811,75	844,3	752,5

## Приложение В

На рисунке В.1 представлена схема системы аспирации с вентиляторами, циклонами и напольными отсосами.

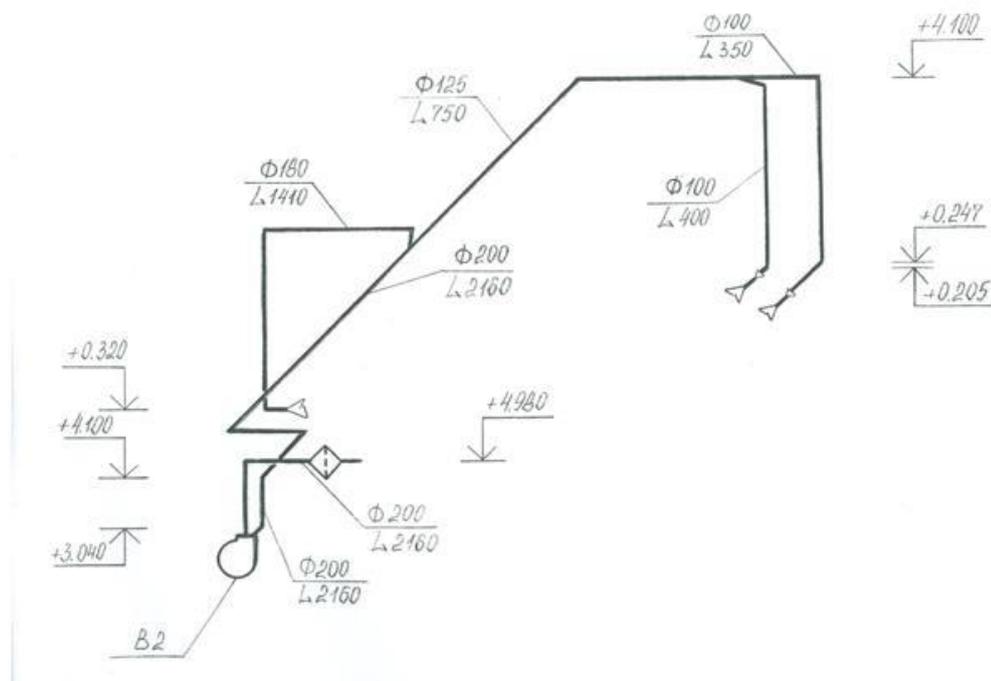


Рисунок В.1 – Схема системы аспирации

Таблица В.1 – Расчет стоимости системы вакуумной пылеуборки

Позиция	Артикул	Ду	Вакуумный агрегат	Цена за ед., евро	Кол-во	Стоимость, евро
1			PES 301/75, 500 мбар, 4200 м <sup>3</sup> /час	66 480,00 €	1	66 480,00 €
1.1			Температурный выключатель двигателя	1 050,00 €	1	1 050,00 €
1.2			Защита V-ремня	370,00 €	1	370,00 €
1.3			Стартер STAR-DELTA (Звезда/Треугольник)	780,00 €	1	780,00 €
1.4			Мотосчетчик	280,00 €	1	280,00 €
1.5			Линейный выключатель	670,00 €	1	670,00 €
1.6			Вентиляторное охлаждение	740,00 €	1	740,00 €
1.7			Предварительная разработка для пульта дистанционного управления 24V*	490,00 €	1	490,00 €
1.8			Вентиляторное охлаждение	740,00 €	1	740,00 €
						71 600,00 €

Позиция	Артикул	Ду	Фильтр-сепаратор	Цена за ед., евро	Кол-во	Стоимость, евро
2			BEPSS 20	15 862,00 €	2	31 724,00 €
2.1			Датчик уровня лопастного типа	2 060,00 €	2	4 120,00 €
2.2			Система очистки фильтра <i>JET-PULSE</i>	6 490,00 €	2	12 980,00 €
2.3			Отдельный блок управления	650,00 €	2	1 300,00 €
						50 124,00 €

Позиция	Артикул	Ду	Фильтр-сепаратор	Цена за ед., евро	Кол-во	Стоимость, евро
2			BEPSS-30	21 660,00 €	2	43 320,00 €
2.1			Датчик уровня лопастного типа	2 060,00 €	2	4 120,00 €
2.2			Система очистки фильтра <i>JET-PULSE</i>	12 290,00 €	2	24 580,00 €
2.3			Отдельный блок управления	650,00 €	2	1 300,00 €
						73 320,00 €

Позиция	Артикул	Ду	Соединительная линия с сепаратором №1	Цена за ед., евро	Кол-во	Стоимость, евро
3.1	100G152	150	- труба L=6 метров	434,40 €	2	868,80 €
3.2	1460152	150	- хомут	30,00 €	8	240,00 €
3.3	0103152	150	- шланг для изгиба	1 538,40 €	4	6 153,60 €
						7 262,40 €

Позиция	Артикул	Ду	Соединительная линия с сепаратором №2	Цена за ед., евро	Кол-во	Стоимость, евро
4.1	100G152	150	- труба L=6 метров	434,40 €	10	4 344,00 €
4.2	1460152	150	- хомут	30,00 €	8	240,00 €
4.3	0103152	150	- шланг для изгиба	1 538,40 €	4	6 153,60 €
						10 737,60 €

Позиция	Артикул	Ду	Трубопровод	Цена за ед., евро	Кол-во	Стоимость, евро
		~ 100	трубопровод, м	80,00 €	200	16 000,00 €
						16 000,00 €

5.1			- труба			
5.2			- шланг для изгиба			
5.3			- хомут			
5.4			- клапан подсоединения шланга к трубопроводу			

Позиция	Артикул	Ду	Комплекующие для всасывания Ду100	Цена за ед., евро	Кол-во	Стоимость, евро
6.1	0710102	100	- адаптер 100/100	134,40 €	4	537,60 €
6.2	0100102	100	- шланг для всасывания резиновый 10 м	976,00 €	6	5 856,00 €
6.3	445300	100	- соединитель шлангов	53,00 €	2	106,00 €
6.4	0200102	100	- труба для всасывания L=1200	99,80 €	4	399,20 €
6.5	1450108	100	- хомут	4,00 €	10	40,00 €
6.6	0260102	100	- насадка для всасывания	1 069,00 €	4	4 276,00 €
6.7	435-574	100	- ручка для всасывающей трубы	97,80 €	4	391,20 €

11 606,00 €

Позиция	Артикул	Ду	Комплекующие для всасывания Ду70	Цена за ед., евро	Кол-во	Стоимость, евро
6.1	0710076	70	- адаптер 100/70	134,40 €	4	537,60 €
6.2	0100076	70	- шланг для всасывания резиновый 10 м	820,00 €	6	4 920,00 €
6.3	445250	70	- соединитель шлангов	47,40 €	2	94,80 €
6.4	0260076	70	- труба для всасывания L=1200	78,40 €	4	313,60 €
6.5	1450076	70	- хомут	3,40 €	10	34,00 €
6.6	0260076	70	- насадка для всасывания	1 029,00 €	4	4 116,00 €
6.7	435-572	70	- ручка для всасывающей трубы	93,60 €	4	374,40 €

10 390,40 €

Общая стоимость системы:

177 720,40 € (с учетом 20 м. фильтра)
---------------------------------------

Таблица В.2–Локальная смета на монтажные работы систем аспирации

№ п/п	Наименование работ и затрат, ед. измерения	Кол-во	Стоимость единицы, руб				Общая стоимость, руб			
			основной зар.платы	эксплуатации ма- шин		всего	основной зар. платы	эксплуатации ма- шин		всего
				всего	в том числе зар.платы			всего	в том числе зар.платы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Установка отсосов, 100 кг	0,363	3,56	0,21	0,06	4,1	1,292	0,076	0,022	1,488
3	Установка циклона одиночного ЦН-15-500'1УП массой 370 кг, 1 шт	1	8,46	0,74	0,22	9,6	8,46	0,74	0,22	9,600
5	Установка вентилятора радиаль- ного пылевого	1	9,59	1,17	0,35	19,7	9,59	1,17	0,35	19,700
	Установка вставок гибких к цен- тробежному вентилятору									
7	В 00.05	1	0,59	0,01	0	5,32	0,59	0,01	0	5,320
8	Н 00.09	1	0,59	0,01	0	4,12	0,59	0,01	0	4,120
9	Прокладка воздуховода системы аспирации из листовой стали тол- щиной 8мм диаметром 100 мм, м2	2,604	1,68	0,05	0,02	9,6	4,375	0,130	0,052	24,998
10	Воздуховод системы аспирации из листовой стали толщиной 8 мм диаметром 100 мм, м2	2,604				7,41				19,296

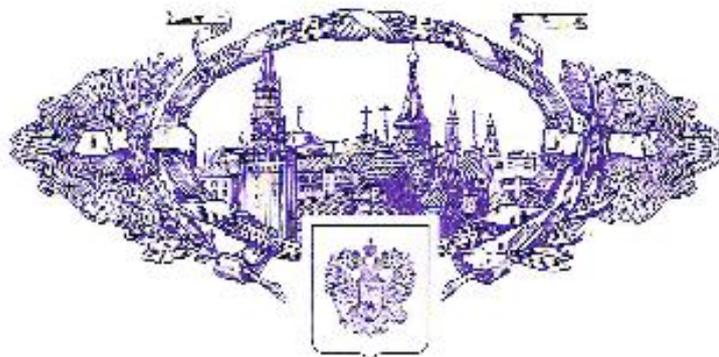
Таблица В.3 – Капитальные вложения, тыс. руб.

№№ п. п.	Вариант 1 (система вакуумной пылеуборки)		Вариант 2 (аспирационные системы)	
	Наименование оборудования	стоимость, тыс. руб.	Наименование оборудования	стоимость, тыс. руб.
1	2	3	4	5
1	Вакуумный агрегат (см. таблицу...)	11018,665	Циклоны	264,640
2			Вентиляторы	242,800
3			Отсосы	15,671
	ИТОГО:	11018,665	ИТОГО:	523,111

Таблица В.4 – Расчет экономической эффективности

№№ п.п.	Наименование ха- рактеристики	Обозначение	Единица из- мерения	Вариант 1	Вариант 2
1	2	3	4	5	6
1	Расход воздуха (на 1 систему)	L	м <sup>3</sup> /ч	4200	2400
2	Давление	ΔP	кПа	51	3,1
3	Мощность (сум- марная)	ΣN <sub>вент</sub>	кВт	90	38
4	Потребляемая мощ- ность		кВт*ч/год	262920	334485
5	Тариф	C <sub>э</sub>	руб/кВт*ч	1,88	1,88
6	Затраты на электро- энергию	Э	тыс. руб/год	494,289	628,832
7	Затраты на теку- щий ремонт систем	ТР	тыс. руб/год	330,560	15,693
8	Амортизационные отчисления	A	тыс. руб/год	1101,866	52,311
9	Зарботная плата обслуживающего персонала	З	тыс. руб/год	468	3744
10	Расходы на управ- ление	У	тыс. руб/год	570,128	1143,601
11	Эксплуатационные затраты в ценах 2016г.	С	тыс. руб/год	2964,843	5584,438
12	Объем потерь про- дукции	П	т/год	6500	6500
13	Возврат продукции	Пв	т/год	5395	3965
14	Стоимость цемента	Сц	руб/т	7140	7140
15	Прибыль от воз- врата цемента	Пр	тыс. руб/год	38520,3	28310,1
16	Приведенные за- траты	П	тыс. руб/год	11433,743	1304,932
17	Экономический эф- фект	Э	тыс. руб/год	81,4	-

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015619490

**Подбор мощности вакуумного насоса в системах  
пневмотранспорта**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального  
образования «Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет» (RU)*

Авторы: *Суханова Инна Ивановна (RU),  
Мартьянова Анна Юрьевна (RU)*

Заявка № 2015616304

Дата поступления 09 июля 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программы для ЭВМ 04 сентября 2015 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

А. И. Кирий



**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**  
**«Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»**  
**(СПбГАСУ)**

2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, 190005. Тел: (812) 400-06-67. Факс: (812) 316-58-72. E-mail: rector @ spbgasu.ru  
ИНН 7809011023 / КПП 783901001, ОКПО 02068580, ОКВЭД 80.30.1

№ \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



УТВЕРЖДАЮ  
проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ»  
д. пед. н., профессор

И.Р. Луговская

**АКТ**

о практическом использовании научных результатов  
диссертационной работы Мартьяновой А.Ю. в учебном процессе СПбГАСУ

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» к.т.н. доцент В.Ф. Васильев, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» д.т.н. Уляшева В. М., доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», к.т.н. Пухкал В.А. составили настоящий акт в том, что научные результаты диссертационной работы Мартьяновой А.Ю.:

- методика расчета вакуумных систем обеспыливания;
- компьютерная программа подбора оборудования для систем обеспыливающей вентиляции;

используются в учебном процессе на кафедре «Теплогазоснабжение и вентиляция» в лекционных курсах и лабораторных работах при изучении дисциплин по направлению подготовки 08.03.01 Строительство (уровень бакалавриата), 08.04.01 Строительство (уровень магистратуры), 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника (уровень бакалавриата), 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника (уровень магистратуры) с 2015г.

Председатель  
к.т.н., доцент

В.Ф. Васильев

Члены комиссии:  
д.т.н., профессор

В.М. Уляшева

к.т.н., доцент

В.А. Пухкал



ООО «АЖИО»  
196128, Россия, Санкт-Петербург, Кузнцовская ул., д.19, оф.206  
тел./факс: +7(812)388-97-18

**УТВЕРЖДАЮ**  
генеральный директор ООО «АЖИО»

*Шангина Н.Н.*  
Шангина Н.Н.  
20 сентября 2016 г.



**АКТ**  
о внедрении диссертационной работы  
Мартьяновой Анны Юрьевны

Комиссия в составе

Председатель:

заместитель генерального директора по производству Кузнецов А.Б.

Члены комиссии:

- главный инженер Тарабукин М.Б.

- начальник производства Павловский С.О.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Мартьяновой А.Ю., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Совершенствование расчета вакуумных систем обеспыливания на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей» были использованы ООО «АЖИО» в проектировании систем вакуумной пылеуборки цеха сухих строительных смесей, при:

– выявлении мест скопления просыпей при производстве сухих строительных смесей;

– разработке схем систем вакуумной пылеуборки, позволяющих удалять просыпи непосредственно от зон их образования и предусматривающих возврат части материала в технологический процесс;

– подборе трубопроводов и оборудования системы вакуумной пылеуборки по предложенной автором методике.

Предложенные схемы позволяют минимизировать потери сырья и готовой продукции.

Председатель комиссии:

заместитель генерального директора  
по производству

Кузнецов А.Б.

Члены комиссии:

главный инженер

Тарабукин М.Б.

начальник производства

Павловский С.О.

**HYDROCEM**<sup>®</sup>  
система гидроизоляционных материалов

ОБЩЕСТВО С  
ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«Гидроцем»

Адрес: Красносельское ш, 14/28,  
г. Пушкин, г. Санкт-Петербург,  
Российская Федерация, 196603

ИНН 7820042554  
ОГРН 1157847002697

Тел.: +7 (812) 377-86-47  
Моб: +7 (921) 300-11-11

baumix-spb@yandex.ru

Исх. № 35 от 12.09.2016 г.

## СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования

Мартьяновой Анны Юрьевны

Результаты диссертационного исследования, представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение, использованы при реконструкции цеха по производству сухих строительных смесей производственного предприятия «Гидроцем». Численная модель и компьютерная программа применены при проектировании систем и подборе оборудования обеспыливающей вентиляции.

Генеральный директор

Якшилова Л.С.

