

**В. Ф. Васильев, А. Ю. Мартянова,
И. И. Суханова, В. М. Уляшева**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ВЕНТИЛЯЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

**В. Ф. Васильев, А. Ю. Мартьянова,
И. И. Суханова, В. М. Уляшева**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ВЕНТИЛЯЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Монография

Санкт-Петербург
2019

УДК 697.97:628.511

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *А. В. Цыганков* (Университет ИТМО);

д-р техн. наук, профессор *Т. А. Дацюк* (СПбГАСУ)

Васильев, В. Ф.

Совершенствование методов расчета вентиляции предприятий по производству строительных материалов : монография / В. Ф. Васильев, А. Ю. Мартьянова, И. И. Суханова, В. М. Уляшева ; СПбГАСУ. – СПб., 2019. – 259 с.

ISBN 978-5-9227-1001-5

Монография посвящена актуальной проблеме совершенствования методов расчета систем аспирации и пневмотранспорта. Представлены данные лабораторных исследований скоростей витания, трогания и транспортирования твердых частиц в потоке воздуха. Приведены результаты численного моделирования процессов тепло- и массообмена в пылевоздушных потоках с использованием программного комплекса STAR-CCM+. На основе анализа результатов лабораторных и численных экспериментов получены критериальные зависимости для расчета аэродинамических характеристик систем аспирации и пневмотранспорта. Разработаны программа расчета воздухопроводов систем вакуумной пылеуборки и программа подбора оборудования систем всасывающего пневмотранспорта.

Предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией систем аспирации и пневмотранспорта, а также для студентов высших технических учебных заведений.

Табл. 34. Ил. 114. Библиогр.: 137 назв.

Печатается по решению Научно-технического совета СПбГАСУ

ISBN 978-5-9227-1001-5

© В. Ф. Васильев, А. Ю. Мартьянова,
И. И. Суханова, В. М. Уляшева, 2019

© Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет, 2019

Условные обозначения

V – объем, м³;
 D – диаметр трубопровода, м;
 S – площадь, м²;
 G – массовый расход материала, кг/ч;
 w – скорость, м/с;
 p – давление, Па;
 μ' – объемная концентрация смеси, кг/м³;
 μ – массовая концентрация, кг/кг;
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
 ρ – плотность, кг/м³;
 h – высота подъема транспортируемого материала, м;
 d – диаметр частицы, м;
 c – опытный коэффициент сопротивления;
 α – угол, град.;
 Δ – 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;
трэн – 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

Технологические процессы предприятий строительной индустрии по переработке минерального сырья и производству строительных материалов включают следующие операции: дробление, перегрузку, сортировку, транспортирование, обжиг сырья, а также транспортирование готовых материалов. При этом фракционный состав сырья и материалов варьируется от крупнокускового до порошкообразного. Практически на всех этапах производства строительных материалов в окружающую среду поступает значительное количество пыли. 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. Кроме того, часть используемого сырья переходит в отходы и просыпи, которые являются источником вторичного образования пыли.

Для обеспечения нормируемых параметров микроклимата в цехах предусматриваются аспирационные системы с технологическими отсосами. В аспирационных системах таких цехов используются преимущественно сухие пылеуловители (циклоны), размещаемые на территории промышленных площадок. Такие аппараты позволяют утилизировать отходы предприятия, но при этом имеет место проблема очистки воздуха от склонной к цементированию пыли при низких температурах наружного воздуха. В производстве строительных материалов, например, для получения известняковой муки, широко используются термические процессы, в результате

которых в атмосферу выбрасываются горячие отработанные газы. Использование теплоты дымовых газов для повышения эффективности очистки холодных вентиляционных выбросов может способствовать снижению теплового воздействия на атмосферу.

Кроме того, отсутствие технической возможности полной герметизации пылящего оборудования обуславливает недостаточно эффективное удаление пыли аспирационными системами. Для сбора пыли с поверхностей пола и оборудования наиболее эффективным является вакуумный способ, позволяющий не только удалять мелкодисперсную пыль из любых труднодоступных мест и улучшать условия труда работающих, но и обеспечивать возврат материалов в технологический процесс.

В теорию и практику аэродинамики и очистки пылевоздушных потоков существенный вклад внесли отечественные и зарубежные ученые: О. А. Аверкова, В. Н. Азаров, В. Е. Воскресенский, И. Гастерштадт, М. П. Калинушкин, Л. С. Клячко, П. А. Коузов, А. А. Курников, И. Н. Логачев, К. И. Логачев, В. И. Минко, О. Д. Нейков, А. И. Пирумов, В. И. Полушкин, В. А. Успенский, Е. А. Штокман и др. Несмотря на обширные экспериментальные исследования, современная база данных по аэродинамическим характеристикам не охватывает всего многообразия пылевых частиц, что влияет на качество проектных решений в области систем обеспыливания различных производств.

В данной работе предпринята попытка обобщить опыт исследований сотрудников кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета в области аэродинамики и тепло- и массообмена систем обеспыливания воздуха на предприятиях по производству строительных материалов.

На основании выполненных лабораторных исследований авторами разработаны численные модели аэродинамики пылевоздушных потоков при различных краевых условиях. Численное моделирование уравнений Навье-Стокса, энергии и примеси с использованием программного комплекса STAR-CCM+ позволило получить про-

странственные поля распределения параметров (концентрации, скорости движения, температуры и т. п.). Обобщение результатов численных экспериментов с использованием теории подобия представлено в виде универсальных критериальных зависимостей, которые могут быть использованы для расчетов подобных систем.

Данные экспериментов положены в основу разработки программ расчета воздухопроводов и подбора оборудования вакуумных систем обеспыливания воздуха.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании аспирационных и вакуумных систем обеспыливания, а также при исследованиях аэродинамики и тепло- и массообмена на предприятиях различных отраслей народного хозяйства.

Авторы выражают признательность д. т. н., профессору В. И. Полушкину за ценные предложения.

Глава 1

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЦЕХОВ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Общая характеристика объектов исследований

Строительные материалы и изделия делятся [22] на природные (естественные) и искусственные. Естественные (без изменения состава и внутреннего строения), соответственно, в свою очередь подразделяются на неорганические (каменные материалы) и органические (древесные материалы). Искусственные в зависимости от основного способа получения делят:

- на безобжиговые (твердение при нормальных условиях) и автоклавные (твердение при температуре 175–200 °С и давлении водяного пара 0,9–1,6 МПа);
- обжиговые, в которых твердение происходит из огненных расплавов.

Безобжиговые подразделяются:

- на неорганические (клинкерные и цементы, содержащие клинкер, гипсовые, магнезиальные и др.);
- органические (битумные и дегтевые вяжущие вещества, эмульсии, пасты);
- полимерные (термопластичные и терморреактивные);

- комплексные:
- смешанные (смещения нескольких видов минеральных веществ);
- компаундированные (смеси и сплавы органических материалов);
- комбинированные (объединение минерального с органическим или полимерным).

Обжиговые подразделяются на:

- шлаковые (по химической основности шлака);
- керамические (по характеру и разновидности глины и др. компонентов);
- стекломассовые (по показателю щелочности шихты);
- каменное литье (по виду горной породы);
- комплексные (по виду соединяемых компонентов, например шлакокерамические, стеклошлаковые).

Природные каменные материалы и изделия получают путем обработки горных пород. По способу получения каменные материалы подразделяют на:

- рваный камень (бут) – добывают взрывным способом;
- грубоколотый камень – получают раскалыванием без обработки;
- дробленый – получают дроблением (щебень, искусственный песок);
- сортированный камень (булыжник, гравий).

Каменные материалы по форме делят на камни неправильной формы (щебень, гравий) и штучные изделия, имеющие правильную форму (плиты, блоки).

Щебень – остроугольные куски горных пород размером 5–70 мм, получаемые при механическом или природном дроблении бута (рваный камень) или естественных камней. Его используют в качестве крупного заполнителя для приготовления бетонных смесей, устройства оснований.

Гравий – окатанные куски горных пород размером 5–120 мм, используется для приготовления искусственных гравийно-щебенистых смесей.

Песок – рыхлая смесь зерен горных пород размером 0,14–5 мм. Он образуется обычно в результате выветривания горных пород, но может быть получен и искусственным путем при дроблении гравия, щебня и кусков горных пород.

Источником получения нерудных строительных материалов служат каменные, гравийные, песчаные и гравийно-песчаные месторождения. Для применения в строительстве щебня, гравия и песка их требуется предварительно обработать – подвергнуть дроблению и сортировке. Заводы по производству строительных материалов, как правило, строят вблизи карьеров. Разработку (добычу) сырья осуществляют на карьерах открытым способом – экскаваторами. Транспортировку сырья от карьера производят автосамосвалами, вагонетками или транспортерами в зависимости от удаленности карьера от завода по производству нерудных строительных материалов. Основным этапом после добычи минерального сырья является дробление и помол.

Камень из приемного бункера попадает на лотковый питатель, который подает его в щековую дробилку; раздробленный камень подается конвейером и ротационным элеватором на виброгрохот. Фракции, не прошедшие через сито виброгрохота, поступают на вторичное дробление в валковую дробилку.

Измельчением называется процесс превращения крупных кусков материала в мелкие под действием внешних сил. Величина внешних сил должна быть достаточной для преодоления внутренних сил сцепления частиц материала. Процесс измельчения характеризуется степенью (коэффициентом) измельчения i , величина которой показывает, во сколько раз уменьшился средний размер кусков материала после измельчения по отношению к их первоначальному среднему размеру:

$$i = \frac{D_{\text{cp}}}{d_{\text{cp}}}, \quad (1.1)$$

где D_{cp} – среднеарифметическое значение трех размеров куска (длина, ширина, высота) до измельчения, м; d_{cp} – то же после измельчения, м.

При грубом измельчении (дроблении) коэффициент измельчения i составляет 3–20, при тонком (помоле) достигает 500–1000. Машины, служащие для грубого измельчения, получили название дробилок, а тонкого – мельниц.

Процесс дробления условно делят на три стадии: крупное дробление – с измельчением кусков материала от 1500–1000 до 300–200 мм, среднее дробление – от 300–200 до 80–20 мм и мелкое дробление – от 80–20 до 10–3,0 мм.

Процесс помола соответственно делится на грубый помол – измельчение материала до размера части 0,3–0,1 мм, тонкий помол – до размера 0,1–0,001 мм, и сверхтонкий, когда размер частиц в материале ниже 0,001 мм. Обычно крупность исходных материалов и продукта измельчения оценивают по количественному составу отдельных фракций, который определяется рассевом на ситах (ситовой анализ).

Различают четыре способа воздействия на материал при измельчении: раздавливание, раскалывание, истирание и удар. Способ измельчения выбирают, учитывая свойства материала: для твердых – эффективным являются удар и раскалывание, для вязких – истирание, для хрупких – раскалывание.

Дробление и помол являются основными технологическими стадиями при производстве извести и известняковой муки. Дроблению подвергают карбонатное сырье и твердое топливо перед загрузкой в печной агрегат и перед помолом в мельницах. Известь подвергают как дроблению, так и дальнейшему измельчению в мельницах.

Дробилки, применяемые в известковом производстве, по конструкции и принципу действия разделяют на следующие типы:

– щековые (рис. 1.1, *а*), в которых раздавливание и частичное истирание материала происходит между неподвижной и подвижной щеками;

– конусные (рис. 1.1, *б*), раздавливание и истирание материала в которых происходит между неподвижным наружным 1 и вращающимся внутренним 2 конусами;

– валковые (рис. 1.1, *в*), в которых материал измельчается раздавливанием и частичным истиранием между вращающимися навстречу валками;

– ударного действия (рис. 1.1, *з*), в которых материал измельчается вследствие ударов по кускам быстро вращающихся молотков, кусков друг о друга, о плиты брони и колосники.

Мельницы подразделяются на следующие типы:

– быстроходные ударного действия, аналогичные с молотковыми дробилками (рис. 1.1, *з*), шахтные с шарнирно-подвешенными молотками, аэробильные с жестко укрепленными молотками и корзинчатого типа или дезинтеграторы; мельницы работают по принципу удара и отчасти истирания;

– тихоходные (рис. 1.1, *д*), измельчающие при вращении материал по принципу удара и частичного истирания свободно падающими мелющими телами (шарами, цилиндрами, стержнями).

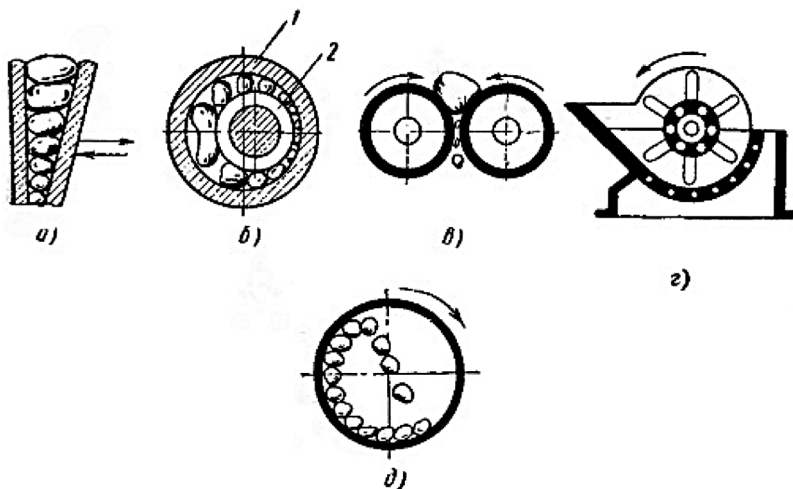


Рис. 1.1. Схемы работы дробильно-помольных машин:

а – щековых дробилок; *б* – конусных дробилок; *в* – валковых дробилок;

з – дробилок и мельниц ударного действия; *д* – шаровых мельниц;

1 – неподвижный конус; *2* – подвижный конус

Щековые дробилки (рис. 1.2) применяют для крупной и средней стадии дробления. Конструктивно дробилки различаются по двум признакам: по характеру движения подвижной щеки (простое и сложное качание) и по расположению оси ее подвеса (верхнее – у загрузочного отверстия и нижнее – у выходного).

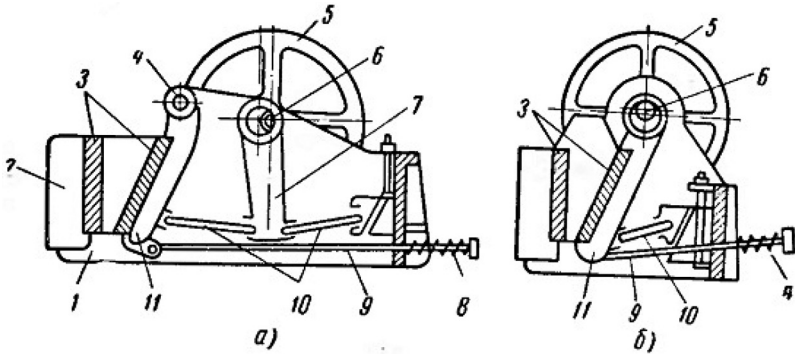


Рис. 1.2. Щековые дробилки:

- а* – с простым качанием щеки; *б* – со сложным качанием щеки;
 1 – рама; 2 – неподвижная плита; 3 – съемные плиты; 4 – ось;
 5 – маховик; 6 – эксцентриковый вал; 7 – шатун; 8 – пружина;
 9 – штанга; 10 – распорные плиты; 11 – подвижная щека

Дробилка с простым качанием щеки (рис. 1.2, *а*) состоит из рамы 1, на которой закреплены неподвижная плита 2 и ось 4 с подвижной щекой 11. Рабочей частью подвижной и неподвижной щек являются съемные плиты 3. Маховик 5 вращает эксцентриковый вал 6, на котором подвешен шатун 7. При движении шатуна 7 вверх распорные плиты 10 выпрямляются, сжимая пружину 8 и сближая щеки, в результате чего происходит раздавливание материала съемными плитами 3. При опускании шатуна распорные плиты наклоняются, пружина 8 посредством штанги 9 оттягивает вправо подвижную щеку 11 и материал под действием собственного веса выпадает из выходной щели.

Дробилка со сложным качанием щеки (рис. 1.2, *б*) имеет одинарный шарнирно-рычажный механизм с одной распорной плитой.

Подвижная щека подвешена непосредственно к эксцентриковому приводному валу 6. При вращении вала подвижная щека 11 совершает эллипсовидное движение, раздавливая материал и помогая ему двигаться в направлении выходной щели. Эти дробилки более производительны, но имеют повышенный износ съемных плит за счет одновременного раздавливания и истирания материала.

Следующий этап – это сортировка и сепарация. На многих участках известкового производства материал сортируют по размеру зерен (кусков). Разделение материалов производится механическим, воздушным, магнитным и гидравлическим способом.

Наиболее широкое применение нашел механический способ сортировки, или *грохочение*. Грохочение применяют перед дроблением, а также в промежутке между первичной или вторичной стадиями дробления. Грохочение выполняется грохотами – сортировочными машинами, снабженными поверхностями грохочения. Применяют три вида поверхностей грохочения: параллельные колосники, листы со штампованными или просверленными отверстиями (решета) и проволочные плетеные ткани (сетки или сита). В последнее время наряду с металлическими ситами начинают применять более стойкие резиновые и капроновые сетки. Количество получаемых при грохочении фракций материала определяется числом применяемых сит, а размер кусков каждой фракции – размером отверстий соответствующих сит. Эффективность сортировки материала грохотами оценивается коэффициентом качества грохочения, равного отношению количества кусков (частиц) материала, размер которых несколько меньше размера отверстий в сите, к фактическому количеству кусков этого класса в исходном материале. Коэффициент качества грохочения зависит от размера отверстий сита в свету и их формы, угла наклона грохота, скорости продвижения по нему материала, влажности материала, количества глинистых примесей и т. п.

Воздушная сепарация широко применяется для отделения готового продукта от общего потока. Способ основан на выделении частиц материала определенного размера под действием силы тяжести из вертикального или горизонтального потока, или под влиянием центробежной силы из криволинейного потока. Аппараты,

в которых осуществляется этот способ, называются воздушными сепараторами. Работа сепараторов характеризуется коэффициентом полезного действия, представляющего отношение количества готового продукта к общему количеству пыли, поступившей в сепаратор.

Магнитный способ применяется в магнитных сепараторах для выделения из материала стальных и чугунных предметов перед его поступлением в дробильно-размольные или транспортные машины и механизмы.

Гидравлический способ применяют при промывке засоренного глиной и песком известняка на карьере или перед подачей в обжиговые печи.

Воздушные сепараторы подразделяются на два основных типа: воздушно-проходные и механические. В воздушно-проходных сепараторах воздушный поток создается вентилятором, расположенным вне сепаратора. В механических сепараторах внутри аппарата установлен вентилятор, который создает в нем замкнутый поток воздуха. Из воздушных классификаторов первого типа наиболее широко применяют двухконусный воздушно-проходной сепаратор (рис. 1.3).

Сепаратор состоит из наружного конуса 2 и внутреннего 4, образующих наружную (кольцевую) 3 и внутреннюю 7 камеры. Нагнетаемый вентилятором воздушный поток, содержащий продукт помола, поступает в сепаратор по трубе 1 со скоростью 15–20 м/с. Попав в камеру 3, воздушный поток расширяется, а его скорость падает до 4–6 м/с. При этом в камере 3 происходит выпадение из потока частиц, скорость взвешивания которых выше скорости потока в кольцевой камере.

Выпавшие частицы по патрубку 8 возвращаются в мельницу для повторного помола. Из камеры 3 поток поступает в камеру 7, проходя при этом через направляющий аппарат 5, который при помощи лопаток придает ему вращательное движение. Под действием инерционно-центробежных сил происходит второе выделение частиц материала из потока. Осажденный продукт собирается в конусе 4 и по патрубку 8 направляется на домол. Тонкая фракция вместе с воздухом выносятся из сепаратора через выходной патрубок 6 и поступает в циклоны на очистку. КПД сепаратора регулирует-

ся положением лопаток направляющего аппарата и скоростью воздушного потока.

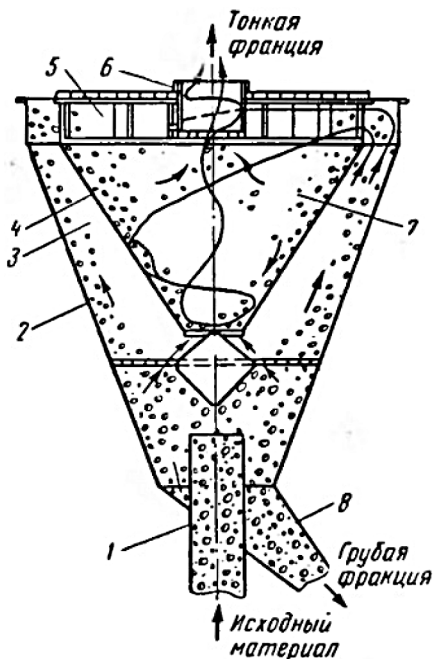


Рис. 1.3. Двухконусный воздушно-проходной сепаратор:
1 – входная труба; 2 – наружный конус; 3 – наружная камера;
4 – внутренний конус; 5 – направляющий аппарат; 6 – выходной патрубок;
7 – внутренняя камера; 8 – патрубок грубой фракции

Из механических сепараторов широко применяют центробежно-воздушный сепаратор (рис. 1.4). Сепаратор состоит из наружного конуса 1 и вставленного в него внутреннего конуса 2. Во внутреннем конусе соосно с ним расположен полый вал 9, на котором укреплены гуммированный диск 4 и лопастный вентилятор 5. Сортируемый материал поступает на быстро вращающийся диск 4 через загрузочную воронку и полый вал 9.

Под действием центробежных сил частицы материала отбрасываются к стенкам внутреннего конуса, где попадают в восходящий поток воздуха, создаваемого вентилятором 5. Крупные частицы оседают во внутреннем конусе и по патрубку 10 возвращаются в мельницу на домол, а мелкие увлекаются восходящим потоком воздуха вверх.

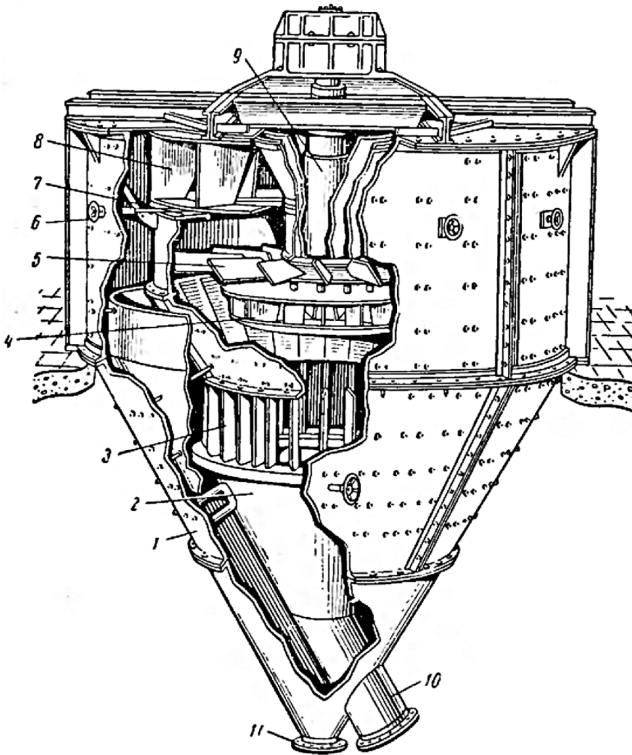


Рис. 1.4. Центробежно-воздушный сепаратор:

- 1 – наружный конус; 2 – внутренний конус; 3 – направляющий аппарат;
- 4 – диск; 5 – лопастный вентилятор; 6 – ручка; 7 – лепестковая диафрагма;
- 8 – отбойные лопасти; 9 – полый вал; 10 – патрубок для выхода крупной фракции; 11 – течка готового продукта

В верхней части сепаратора поток проходит через отбойные лопасти 8 и отбрасывается вентилятором 5 к стенкам наружного конуса (корпуса). Выделенные из потока частицы по кольцевому пространству опускаются вниз к течке 11 готового продукта. Очищенный от частиц продукта воздух засасывается вентилятором через направляющий аппарат 3 во внутренний конус 2, где он снова подхватывает частицы разбрасываемого диском 4 материала.

Тонкость готового продукта регулируют поворотом лопаток направляющего аппарата и изменением при помощи ручки 6 положения горизонтальной лепестковой диафрагмы-заслонки 7. При этом изменяется скорость восходящего потока воздуха, что приводит к соответственному уменьшению или увеличению крупности частиц уносимой фракции.

Механические сепараторы эффективно работают с одно- и двухкамерными шаровыми мельницами при помоле извести по замкнутому циклу.

Гидратационными (неорганическими) вяжущими веществами называют тонко измельченные материалы (порошки), которые при смешивании с водой образуют пластичное тесто, способное в процессе химического взаимодействия с ней затвердевать, набирать прочность, связывая при этом в единый монолит введенные в него заполнители, обычно каменные материалы (песок, гравий, щебень), образуя тем самым искусственный камень.

Гидратационные (неорганические) вяжущие вещества подразделяются на воздушные (твердеющие и набирающие прочность только в воздушной среде) и гидравлические (твердеющие во влажной, воздушной среде и под водой) вяжущие вещества.

Строительная воздушная известь (СаО) – продукт умеренного обжига при 900–1300 °С природных карбонатных пород (СаСО₃), содержащих до 8 % глинистых примесей (известняк, доломит, мел и др.). Обжиг осуществляют в шахтах и вращающихся печах. Наиболее широкое распространение получили шахтные печи. При обжиге известняка в шахтной печи движущийся в шахте сверху вниз материал проходит последовательно три зоны: зону подогрева (сушка

сырья и выделение летучих веществ), зону обжига (разложение веществ) и зону охлаждения. В зоне подогрева известняк нагревается до 900 °С за счет тепла, поступающего из зоны обжига от газообразных продуктов горения. В зоне обжига происходит горение топлива и разложение известняка (CaCO_3) на известь (CaO) и диоксид углерода (CO_2) при температуре 1000–1200 °С. В зоне охлаждения обожженный известняк охлаждается до 80–100 °С воздухом.

В результате обжига полностью теряется двуокись углерода и получается комовая, негашеная известь в виде кусков белого или серого цвета. Комовая негашеная известь является продуктом, из которого получают разные виды строительной воздушной извести: молотую порошкообразную негашеную известь, известковое тесто.

Строительную воздушную известь различного вида используют при приготовлении кладочных и штукатурных растворов, бетонов низких марок (работающих в воздушно-сухих условиях), изготовлении плотных силикатных изделий (кирпича, крупных блоков, панелей), получении смешанных цементов.

Гидравлические вяжущие вещества используют в тяжелых условиях эксплуатации, требующих не только прочностных свойств, но и обладающих водостойкостью, морозостойкостью и коррозионной стойкостью.

Гидравлическую известь получают умеренным обжигом природных мергелей и мергелистых известняков при 900–1100 °С. Мергель и мергелистый известняк, идущие для производства гидравлической извести содержат от 6 до 25 % глинистых и песчаных примесей. Ее гидравлические свойства характеризуются гидравлическим (или основным) модулем (m), представляющим отношение в процентах содержания оксидов кальция к содержанию суммы оксидов кремния, алюминия и железа.

Гидравлическая известь – медленно схватывающееся и медленно твердеющее вещество. Ее применяют для приготовления строительных растворов, низкомарочных бетонов, легких бетонов, при получении смешанных бетонов.

При производстве извести различают гашеную и негашеную известь. Гашение комовой извести в пушонку производят ручным и механизированным способом. Вручную известь гасят методом опрыскивания слоя комовой извести или методом погружения в воду извести, находящейся в металлической корзине. Оба эти способа дорогие и нерациональные по сравнению с механизированным.

Рассматриваемое вещество представляет собой, таким образом, оксид кальция. В промышленности данный материал в общем случае получается посредством термической обработки известняка, то есть карбоната кальция.

При взаимодействии с водой негашеная известь превращается в гашеную – при этом происходит выделение тепла. При смешении с кислотами рассматриваемое вещество образует соли. Если его сильно нагреть с углеродом, то сформируется карбид кальция.

Используется негашеная известь чаще всего:

- 1) как сырье при выпуске силикатного кирпича;
- 2) как огнеупорный материал;
- 3) как и гашеная известь – в качестве пищевой добавки;
- 4) для очистки дымовых газов от диоксида серы.

Производство негашеной комовой извести состоит из следующих основных операций: добычи и подготовки известняка, подготовки топлива и обжига известняка. Известняк добывают открытым способом в карьерах. Плотные известково-магнезиальные породы взрывают. Для этого вначале с помощью станков ударно-вращательного (при твердых породах) или вращательного бурения (при породах средней прочности) бурят скважины диаметром 105–150 мм глубиной 5–8 м и более на расстоянии 3,5–4,5 м одна от другой. В них закладывают необходимое количество взрывчатого вещества (игданита, аммонита) в зависимости от прочности породы и мощности пласта.

Наблюдающаяся иногда неоднородность залегания известняков в месторождениях (по химическому составу, прочности, плотности и т. п.) обуславливает необходимость выборочной разработки полезной породы. Полученную массу известняка в виде крупных и мел-

ких кусков погружают в транспортные средства одноковшовым экскаватором. Известняк доставляют на комбинат автосамосвалами.

Высококачественную известь можно получить только при обжиге известняка в виде кусков, мало различающихся по размерам. При обжиге известняка в кусках разного размера получается неравномерно обожженная известь (мелочь оказывается частично или полностью пережженной, сердцевина крупных кусков – необожженной). Кроме того, при загрузке шахтных печей известняком разного размера значительно увеличивается степень заполнения шахтной печи, а, следовательно, уменьшается газопроницаемость материала, что затрудняет обжиг известняка. Поэтому перед обжигом известняк соответствующим образом подготавливают: сортируют по размеру кусков и, если необходимо, более крупные негабаритные куски дробят.

В шахтных печах наиболее целесообразно обжигать известняк раздельно по фракциям 40–80, 80–120 мм в поперечнике. Так как размеры добытого известняка нередко достигают 500–800 мм и более, то возникает необходимость дробления его и сортировки всей полученной после дробления массы на нужные фракции. Это осуществляется на дробильно-сортировочной установке, работающей по замкнутому циклу с использованием щековых дробилок.

Обжиг – основная технологическая операция в производстве негашеной извести. При этом протекает ряд сложных физико-химических процессов, определяющих качество продукта. Цель обжига – возможно более полное разложение (диссоциация) CaCO_3 и $\text{MgCO}_3 + \text{CaCO}_3$, на CaO , MgO и CO_2 и получение высококачественного продукта с оптимальной микроструктурой частичек и их пор.

Если в сырье есть глинистые и песчаные примеси, то во время обжига между ними и карбонатами происходят реакции с образованием силикатов, алюминатов и ферритов кальция и магния.

Реакция разложения (декарбонизация) основного компонента известняка – углекислого кальция идет по схеме: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Теоретически на декарбонизацию 1 моля CaCO_3 (100 г) рас-

ходуется 179 кДж или 1790 кДж на 1 кг CaCO_3 . В пересчете на 1 кг получаемого при этом CaO затраты равны 3190 кДж.

Продолжительность обжига определяется также размером кусков обжигаемого продукта. Для увеличения производительности известеобжигающих печей и снижения пережога поверхностных слоев кусков желателен в допустимых пределах уменьшить их размеры. При обжиге кусков различной крупности режим процесса определяют, исходя из времени, необходимого для обжига кусков средних размеров. Основное различие в технологиях производства негашеной извести – в способе обжига.

Шахтные печи для обжига извести. Шахтные печи, представляющие собой полый цилиндр, имеющий наружный стальной кожух толщиной около 1 см и внутреннюю огнеупорную кладку, вертикально установленный на фундаменте. Эти печи характеризуются непрерывностью действия и простотой в эксплуатации. Строительство шахтных печей требует относительно небольших капиталовложений.

В зависимости от вида применяющегося топлива и способа его сжигания различают шахтные печи, работающие на короткопламенном твердом топливе, вводимом обычно в печь вместе с обжигаемым материалом; так как известняк и кустовое топливо при этом загружают в шахту перемежающимися слоями, то иногда такой способ обжига называют пересыпным, а сами печи – пересыпными; на любом твердом топливе, газифицируемом или сжигаемом в выносных потоках, размещаемых непосредственно у печи; на жидком топливе; на газовом топливе, натуральном или искусственном.

По характеру процессов, протекающих в шахтной печи, различают три зоны по высоте: подогрева, обжига и охлаждения. В зоне подогрева, к которой относят верхнюю часть печи с температурой пространства не выше 850 °С, материал подсушивается и подогревается поднимающимися раскаленными дымовыми газами. Здесь выгорают также органические примеси. Поднимающиеся газы, в свою очередь, благодаря теплообмену между ними и загруженным материалом охлаждаются и далее отводятся из печи.

Зона обжига размещается в средней части печи, где температура обжигаемого материала изменяется от 850 °С до 1200 °С и затем 900 °С; здесь известняк разлагается, из него удаляется диоксид углерода (углекислый газ).

Зона охлаждения – нижняя часть печи. В этой зоне известь охлаждается от 900 °С до 50–100 °С поступающим снизу воздухом, который далее поднимается в зону обжига.

Движение воздуха и газов в шахтных печах обеспечивается работой вентиляторов, нагнетающих в печь воздух и отсасывающих из нее дымовые газы. Противоточное движение обжигаемого материала и горячих газов в шахтной печи позволяет хорошо использовать теплоту отходящих газов на прогрев сырья, а теплоту обожженного материала – на подогрев воздуха, идущего в зону обжига. Далее приведены технические характеристики и схема (рис. 1.5) линии производства негашеной извести:

– производительность – до 5 т/ч (до 10 т/ч при двух дезинтеграционных комплексах);

– исходный материал – известняк, средний грануляционный состав – 40 мм, максимальный – 100 мм, максимальная влажность – 8 %;

– готовый продукт – мука известняковая, максимальная фракция – 300 мкм, влажность – от 0 до 2 %.

Порядок работы линии:

1) исходный материал загружается в бункер ленточного питателя 1 с помощью, например, ковшового погрузчика;

2) ленточный питатель подает материал в дробилку 3; металлические включения улавливаются магнитным сепаратором 2;

3) после дробления материал попадает через разгрузочное устройство в наклонный шнек 4, который транспортирует его в разгрузочное устройство сушилки 5;

4) после сушилки материал подается с помощью элеватора 6 в расходный бункер 7;

5) из бункера материал подается на измельчение в дезинтеграционный комплекс 8;

б) после измельчения материал попадает в бункер готового продукта 9 и посредством разгрузочного комплекса 10 отгружается в транспортную тару.

7) в помольном отделении предусматривается система аспирации, включающая в себя пылеуловитель ЦН-11 с бункером 11; блок фильтров ФР-6 (12); питатели секторные ПС-1 (13); вентилятор ВВД (14) и шиберные заслонки 15.

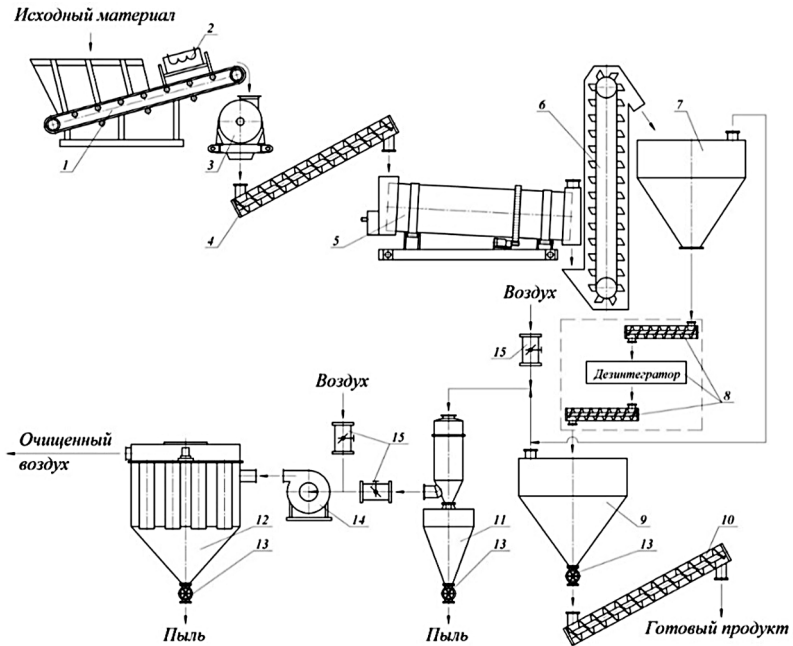


Рис. 1.5. Технологическая схема производства извести:

- 1 – ленточный питатель; 2 – магнитный сепаратор; 3 – дробилка молотковая МПС 600М; 4 – шнек; 5 – сушилка; 6 – элеватор; 7 – расходный бункер;
- 8 – дезинтеграционный комплекс; 9 – бункер готового продукта;
- 10 – разгрузочный комплекс; 11 – пылеуловитель ЦН-11 с бункером;
- 12 – блок фильтров ФР-6; 13 – питатель секторный ПС-1;
- 14 – вентилятор ВВД; 15 – шиберные заслонки

Гидравлическое вяжущее вещество, получаемое путем совместного, тонкого помола клинкера и двуводного гипса, называют портландцементом.

Клинкер – продукт обжига до спекания (при $t > 1480$ °С) однородной, определенного состава природной или сырьевой смеси известняка или гипса. Сырьевую массу обжигают во вращающихся печах.

Портландцемент как вяжущее вещество используют при приготовлении цементных растворов и бетонов.

Шлакопортландцемент – в своем составе имеет гидравлическую добавку в виде гранулированного, доменного или электротермофосфорного шлака, охлаждаемого по специальному режиму. Его получают путем совместного помола портландцементного клинкера (до 3,5 %), шлака (20–80 %), и гипсового камня (до 3,5 %). Шлакопортландцемент характеризуется медленным нарастанием прочности в начальные сроки твердения, однако в дальнейшем скорость нарастания прочности возрастает. Он чувствителен к окружающей температуре, стоек при воздействии на него мягких сульфатных вод, имеет пониженную морозостойкость.

Карбонатный портландцемент получают путем совместного помола цементного клинкера с 30 % известняка. Он обладает пониженным тепловыделением при твердении, повышенной стойкостью.

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

Производство цемента может быть организовано по «сухой», «мокрой» или смешанной технологическим схемам [22], [49], [71], [90], [95], [99]. На рис. 1.6 изображена технологическая схема производства цемента по мокрому способу. В принципе, основные технологические стадии сухого способа аналогичны. За исключением отсутствия подачи воды в операции размолта и замены пульпохранилища силосом сухого сырья.

При обжиге (во вращающихся печах) размолотых кальциевых мергелей и известняка, грунта, карбоната кальция и других добавок

(угольной пыли, кокса и т. д.) получают цементный клинker 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.

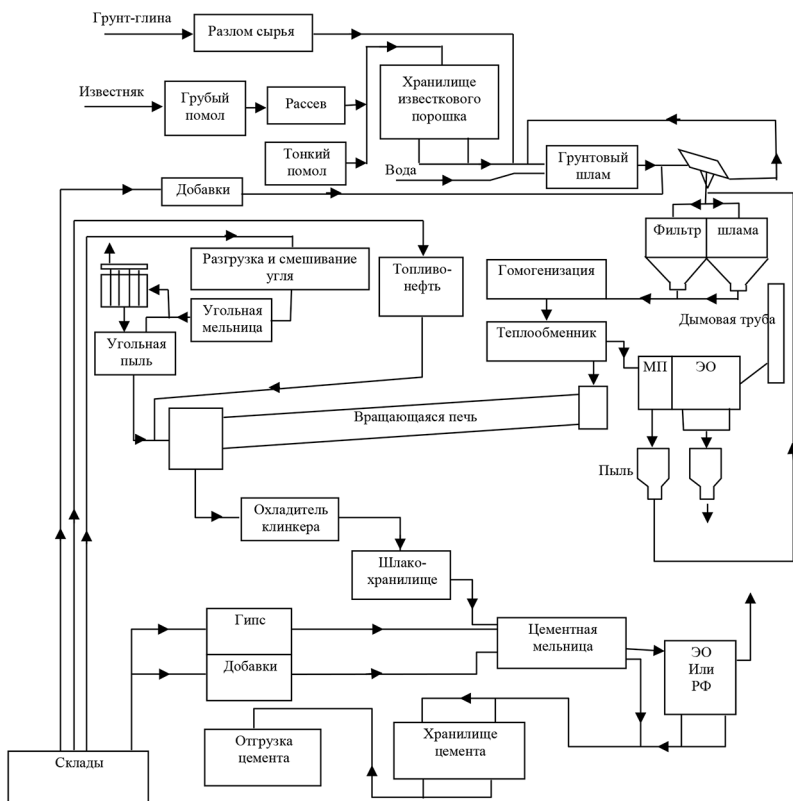


Рис. 1.6. Технологическая схема производства цемента

1.2. Современное состояние воздушной среды цехов по производству строительных материалов

При производстве нерудных строительных материалов – строительной воздушной извести [27], сухих строительных смесей и цемента [22], [26], [49], [71], [90], [95], [99] – выделяются в основном твердые загрязняющие вещества [4], некоторая часть которых переходит в отходы и просыпи, являющиеся интенсивным источником вторичного образования пыли [76]. Пыль образуется при эксплуатации основного технологического оборудования – дробилок, грохотов, мельниц, обжиговых печей, при работе технологического транспорта – транспортеров, шнеков, питателей, при погрузочно-разгрузочных работах и т. п.

При производстве строительных материалов в воздух рабочей зоны поступают аэрозоли преимущественно фиброгенного действия [19], образующиеся при механическом разрушении, дроблении и измельчении твердых веществ, т. е. аэрозоли дезинтеграции. Согласно литературным данным [116]–[118], размеры частиц различных пылей лежат в интервале от 10^{-7} до 10^{-1} см. В зависимости от дисперсности различают: видимую пыль (более 10 мкм), микроскопическую (от 0,25 до 10 мкм), ультрамикроскопическую (менее 0,25 мкм). Дисперсность определяет характер нахождения АПФД в воздухе помещений, так, например, для частиц размерами менее 0,1 мкм характерно броуновское движение. Для более крупных частиц скорость осаждения зависит от их плотности. Существенную роль на пылевую обстановку в помещении оказывают воздушные потоки, создаваемые системами вентиляции, конвективные струи и течения воздуха, возникающие вблизи технологического оборудования.

Как отмечено в работе [4], процессы, связанные с выделением, распространением, осаждением и улавливанием пыли имеют стохастическую природу. В связи с чем для прогнозирования содержания АПФД предложено использование методов классической теории вероятности и аппарата теории случайных процессов.

Рассмотрим особенности формирования пылевой обстановки в помещении при производстве цемента. Согласно данным работы [8] 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 [91].

Источники пыли на цементных предприятиях можно разделить на две группы [64]. Первая, более значимая, включает в себя технологические процессы, куда входят вращающиеся и шахтные печи, охладители клинкера, сырьевые и цементные мельницы, сушилки шлака. Вторая группа состоит из узлов хранения и транспорта, источники которых оказывают вредное воздействие в основном на окружающую среду. Это хранилища сухих материалов – клинкера и шлака, а также связанные с ними обработка, транспортировка и их складирование.

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 [22], [49], [71], [90], [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.

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. 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.

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 г/м³).

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.

В табл. 1.1 приведен примерный химический состав пыли из вращающейся печи.

При сухом способе производства цемента во вращающихся печах с поточным 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.

Таблица 1.1

Примерный химический состав пыли из вращающихся печей

Компоненты	Содержание, %
Диоксид кремния SiO_2	1–22
Оксид алюминия (III) Al_2O_3	2–12
Оксид железа (III) Fe_2O_3	1–16
Оксид марганца (III) Mn_2O_3	0,05–0,13
Оксид кальция CaO	16–48
Оксид магния MgO	0,5–2,0
Триоксид серы SO_3	1,6–13,0
Сера S	0,1–0,4
Оксид калия K_2O	0,5–50
Оксид натрия Na_2O	0,1–5,0
Потери при обжиге (преимущественно диоксид углерода) (CO_2)	5–35

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.

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. 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.

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

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.

Как было уже отмечено, в цехе обжига клинкера основным оборудованием являются вращающиеся или шахтные печи. Обожженный в печах клинкер охлаждается в барабанных или решетчатых охладителях (рис. 1.7) [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 (до 15 м³) мелкодисперсной пыли [64]. Пыль полностью засыпает приямки с пневмовинтовыми насосами, из-за чего возникает перерыв в технологическом процессе.

После проведения химических анализов оценивается возможность возврата части просыпей в технологический процесс:

- во время аварийной остановки электрофильтров, расположенных до печи, выгружаемая из них сырьевая пыль может быть возвращена в склад сырья;
- во время плановой очистки охладителя выгружаемая клинкерная пыль может быть возвращена в склад сырья, во время аварийной остановки – в склад клинкера;

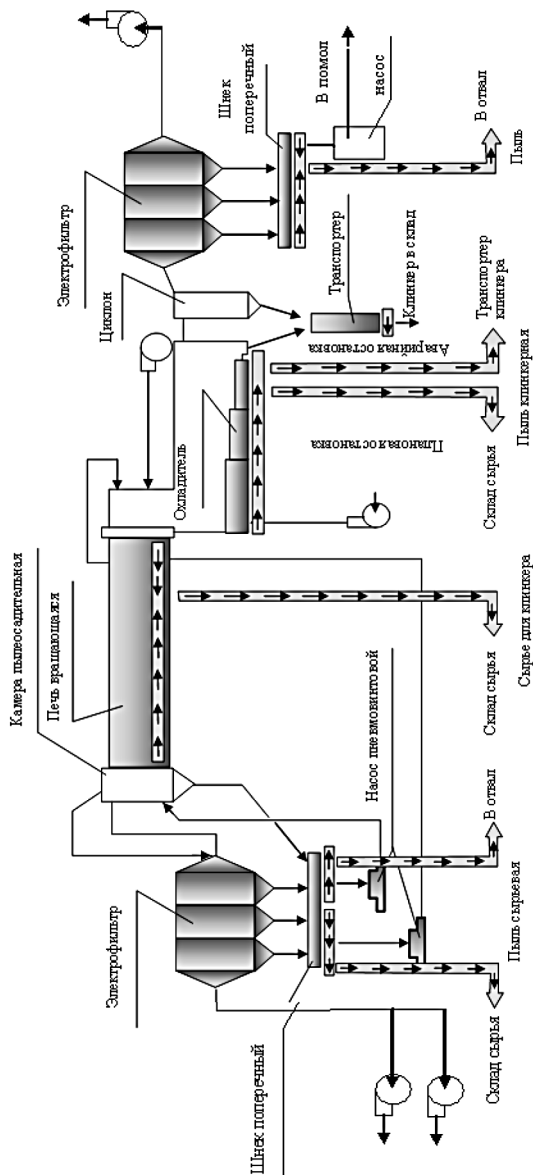


Рис. 1.7. Места образования и схема возврата просорей в цехе обжига клинкера

– во время ремонта печи сырье для клинкера возвращается в склад сырья.

Время простоя печей и охладителей во время ремонта напрямую зависит от времени зачистки оборудования, которое можно значительно сократить при использовании всасывающих систем пневмотранспорта.

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 (рис. 1.8).

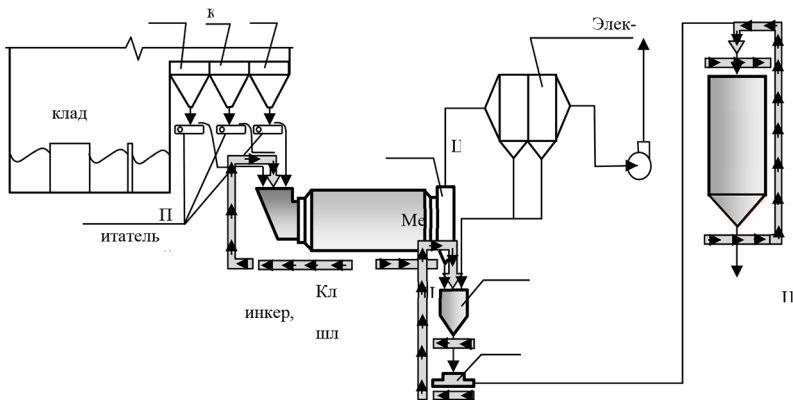


Рис. 1.8. Места образования и схема возврата просыпей в цехе помола цемента и силосах

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 оборудова-

ния 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.

Просьпы 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.

В зависимости от происхождения, химического состава, растворимости, дисперсности, формы пылинок пыль может быть причиной возникновения разнообразных пылевых заболеваний человека. 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, транспортирование и т. д. Эти операции сопровождаются интенсивным выделением пыли в рабочую зону, являющейся опасной, так как в химический состав сырьевых материалов входит двуокись кремния SiO_2 . В табл. 1.2 приведены химические составы материалов и клинкера, применяемых на заводах по производству сухих строительных смесей и цементных заводах [91], [101].

Помимо химического состава негативное влияние пыли на организм человека зависит также от ее дисперсного состава. На рис. 1.9 представлена классификационная номограмма [43], [89], построенная в вероятностно-логарифмической системе координат.

Таблица 1.2

Химические составы некоторых сырьевых материалов и клинкера

Материал	Содержание (масс. %)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	CaO	P ₂ O ₅
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										
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	–

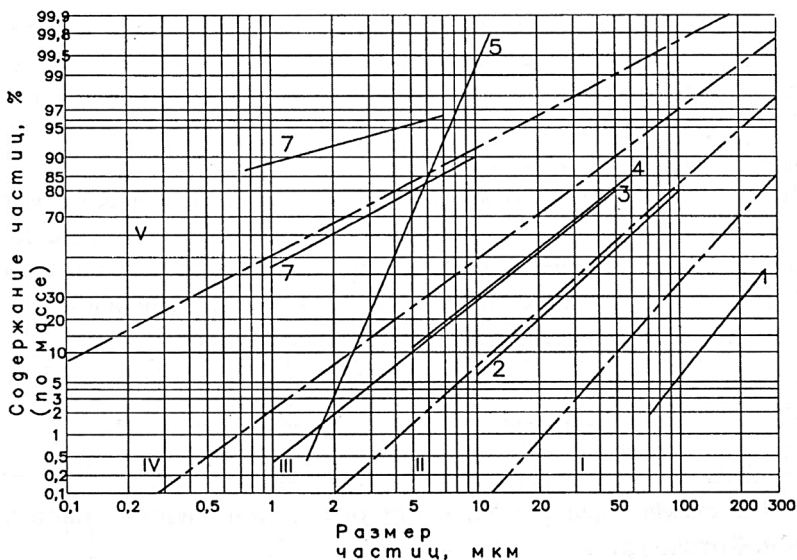


Рис. 1.9. Классификационная номограмма:

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

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 дыхательных 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].

В цехах указанных заводов благодаря значительному разнообразию технологических операций образуется пыль различного происхождения и широкого диапазона размеров [53]. Так, «фракционный состав пыли по результатам дисперсного анализа, содержащийся в аспирационном воздухе сырьевой мельницы цементного завода», представлен в табл. 1.3 [72], [81].

Таблица 1.3

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

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 %).

В соответствии с ГН 2.2.5.3532–18 [19], ПДК пыли в воздухе рабочей зоны производственных помещений цементных заводов и заводов по производству сухих строительных смесей не должна превышать 6 мг/м³. Однако по данным исследований [4], [81] состояния воздушной среды цехов по производству строительных материалов концентрация в воздухе рабочей зоны может превышать ПДК в несколько раз (до 15 мг/м³) даже при нормальной работе оборудования без аварийных ситуаций.

1.3. Системы удаления пыли при производстве строительных материалов (извести, 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 (аспирации). Учитывая физические особенности пыли, существенное значение имеет также пневматическая уборка просыпей пыли. Применение аспирации, как правило, требует локализацию мест пылеобразования аспирационными укрытиями, из которых и производится отсос запыленного воздуха [122].

При расчете систем обычно пользуются нормативными документами, в частности [82], в которых представлены преимущественно опытные данные (табл. 1.4), и рекомендациями по определению необходимой производительности аспирационных укрытий и систем, например, [98].

Таблица 1.4

Исходные данные для выбора систем обеспыливания аспирационного воздуха

Наименование печей	Аэрозоли			Пыль		Тип пылеуловителя
	Концентрация, г/м ³	Температура, °С	Точка росы, °С	Основная фракция	Слипаемость, 10 ² Па	
Шахтные печи (топливо – газ)	0,8	250 – 280	30 – 40	более 20 мкм (до 90 %)	0,3 неслипающаяся	ЦН-15
Вращающаяся печь сухого способа:						
с теплообменником	≤8	250 – 300	42–46	меньше 20 мкм (67 %)	2,4 слабослипающиеся	Электрофильтры
без теплообменника	≤12	400–500	50	меньше 20 мкм (50 %)	2,2 слабослипающиеся	

Окончание табл. 1.4

Наименование печей	Аэрозоли			Пыль		Тип пылеуловителя
	Концентрация, г/м ³	Температура, °С	Точка росы, °С	Основная фракция	Слипаяемость, 10 ² Па	
Дробилка	25	60	20	меньше 20 мкм (70 %)	среднеслипающая	ЦН-15 (1-я ступень), электрофильтр (2-я ступень)
Мельница	20	90	22	меньше 20 мкм (85 %)	9,8 сильнослипающая	

Любая аспирационная установка состоит из двух частей: 1 – устройство для локализации пылевыведений; 2 – комплекс устройств для удаления аспирационного воздуха, очистки и выброса в атмосферу. Принципиальная схема аспирационной системы приведена на рис. 1.10.

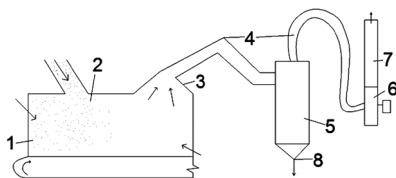


Рис. 1.10. Принципиальная схема аспирационной системы:

- 1 – технологическое оборудование (источник пылевыведений);
- 2 – местный отсос – аспирационное укрытие; 3 – воздухоприемник-аспираторная воронка; 4 – воздуховоды; 5 – пылеуловитель;
- 6 – вентилятор; 7 – выхлопной патрубок;
- 8 – удаление уловленной пыли

Основные требования к проектированию аспирационных систем:

- протяженность воздуховодов должна быть минимальной;
- число местных отсосов на одну аспирационную установку, как правило, не более 5 ед.;

– угол наклона воздухопроводов, как правило, не менее 45–60 град. к горизонту;

– скорости воздуха рекомендуется устанавливать: 10–15 м/с при угле наклона воздухопровода более угла естественного откоса пыли; 15–18 м/с при угле наклона менее угла естественного откоса пыли; 18–20 м/с на горизонтальных участках;

– потери давления в отдельных ветвях следует уравнивать расчетным путем без применения регулировочных клапанов, шиберов (изменением диаметров воздухопроводов и их длины);

– скорость в приемных отверстиях воздухоприемников необходимо определять, исходя из дисперсности пыли (рекомендуемые скорости воздухоприемников: для укрытий оборудования первичного дробления не более 3 м/с; для укрытий оборудования вторичного и третичного дробления не более 2 м/с; для укрытий сортировочного оборудования не более 1,5 м/с);

– воздухоприемники на укрытиях должны размещаться с учетом максимального сокращения уносов пыли в воздухопроводы;

– воздухопроводы должны быть из листовой стали толщиной 1,5–3 мм, радиусы закруглений воздухопроводов рекомендуется выполнять не менее двух диаметров. Тройники (отводы) должны иметь угол примыкания не более 30 град.;

– аспирационные системы должны, как правило, блокироваться с пусковыми устройствами технологического оборудования.

Конструкции аспирационных укрытий определяются особенностями технологического оборудования, поскольку относятся к закрытому типу местных отсосов. Кроме того, необходимо также учитывать характер технологического процесса, физико-химические свойства перерабатываемого материала и стадию обработки материала. Например, в тех случаях, когда измельченный материал является конечным продуктом, необходимо полностью отделить и уловить пыль. Во избежание уноса материала, необходимо, чтобы воздухоприемники не располагались на пути воздушного потока, поступающего в укрытие.

Основные требования, предъявляемые к местным укрытиям:

- при конструировании конфигурации укрытия необходимо учитывать направление пылевоздушного потока, обусловленное действующими в укрытии аэродинамическими и механическими силами и эффектами;
- площадь неизбежных открытых рабочих проемов и неплотностей должна быть минимальной для предотвращения выделения пыли в производственные помещения;
- унос пыли в аспирационную установку должен быть минимальным для сокращения нагрузки на систему аспирации;
- удобное обслуживание технологического оборудования;
- достаточная прочность для восприятия ударов транспортируемого материала.

Далее приведены некоторые конструкции аспирируемых укрытий (рис. 1.11–1.16).

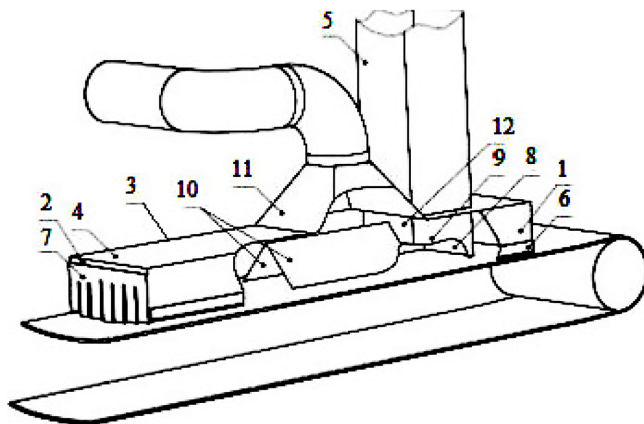


Рис. 1.11. Общий вид перегрузочного узла, оборудованного аспирационным укрытием [84]: 1–3 – стенки укрытия; 4 – верхняя крышка; 5 – перегрузочный желоб; 6, 7 – эластичные уплотнения; 8 – задняя стенка внутреннего короба; 9 – боковые стенки внутреннего короба; 10 – боковые наклонные стенки внутреннего короба; 11 – аспирационная воронка; 12 – передняя стенка внутреннего короба

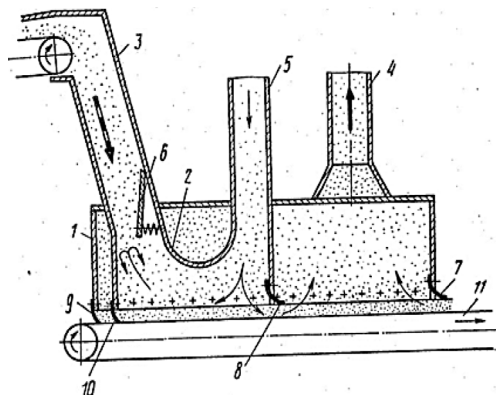


Рис. 1.12. Аспирационное устройство узла загрузки ленточного транспортера [85]: 1 – корпус укрытия; 2 – байпасная камера; 3 – желоб; 4 – аспирационный патрубок; 5 – рециркуляционный воздуховод; 6 – шибер; 7–10 – элементы уплотнений; 11 – лента транспортера

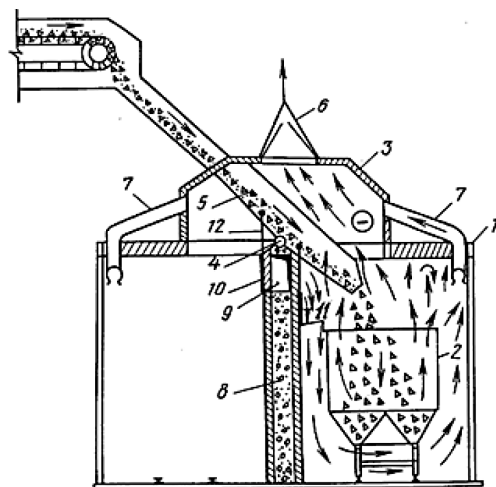


Рис. 1.13. Устройство системы аспирации для погрузки сыпучего материала [86]: 1 – камера; 2 – емкость; 3 – аспирационное укрытие; 4 – горизонтальная ось; 5 – желоб; 6 – пылеприемники; 7 – система воздуховодов; 8 – вертикальная продольная перегородка; 9 – канал; 10 – окна

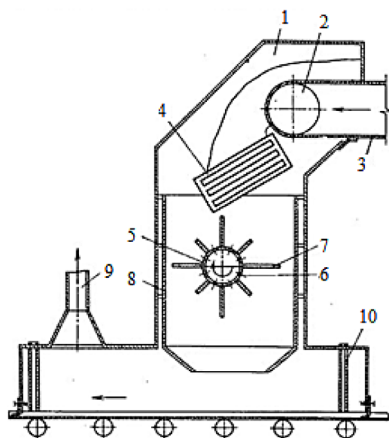


Рис. 1.14. Аспирационное укрытие пункта перегрузки сыпучих материалов [87]: 1 – защитный кожух; 2 – барабан загрузочного конвейера; 3 – загрузочный конвейер; 4 – рассекатель; 5 – пустотелый вал; 6 – отверстия; 7 – ступенчатые лопатки; 8 – защитный короб; 9 – аспирационная воронка; 10 – уплотняющие фартуки

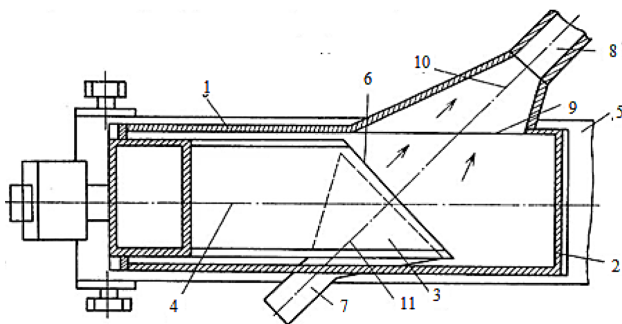


Рис. 1.15. Укрытие места загрузки ленточного конвейера [88]: 1, 2 – боковые и торцевые стенки корпуса; 3 – лоток питателя; 4 – продольная ось питателя; 5 – продольная ось ленты конвейера; 6 – разгрузочный конец лотка; 7 – нагнетательный патрубок; 8 – аспирационный патрубок; 9 – входное отверстие; 10, 11 – продольные оси патрубков

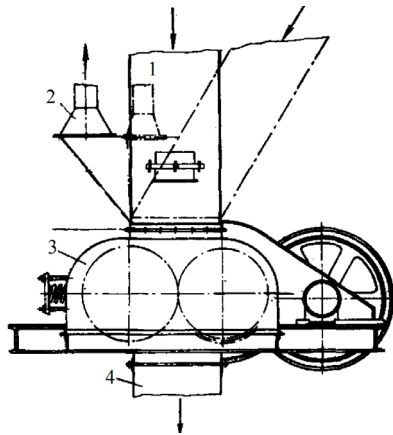


Рис. 1.16. Укрытие валковой дробилки: 1 – загрузочный желоб; 2 – аспирационная воронка; 3 – корпус дробилки; 4 – разгрузочный желоб

В полости укрытия за счет отсосов воздуха создается разрежение, вследствие этого через неплотности воздух из помещения поступает в укрытие, препятствуя выбрасыванию пыли в помещение.

Для снижения расхода аспирируемого воздуха и уноса мелких фракций пыли в укрытии могут использоваться байпасная камера, рециркуляционный воздухопровод и уплотнительные элементы (см. рис. 1.12), вертикальные перегородки (см. рис. 1.13), защитные кожухи, уплотнительные фартуки, пластинчатые и вращающиеся рассекатели потока (см. рис. 1.14), направляющие струи (см. рис. 1.15) и т. д.

Несмотря на практически полную локализацию пыли в помещении происходит истечение запыленных потоков через неплотности технологического оборудования и из-под аспирационных укрытий вследствие возникновения избыточных давлений. Как отмечено в работе [81], причинами возникновения избыточных давлений могут быть:

- аэродинамическое взаимодействие воздушных и пылевых потоков между собой и со стенками оборудования и аспирационных укрытий при перегрузках сыпучих материалов;

- вращательный и ударный способ работы рабочих элементов дробилок, который генерирует направленное движение пылевоздушных потоков;
- порционная загрузка емкостей;
- отличие плотности горячей пылевоздушной смеси от плотности окружающего воздуха.

И, как показывает анализ исследований [53], 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 [53]. А так как сыпучие строительные материалы являются слеживающимися материалами [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 малопроизводительна 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. [33], [34], [43], [53].

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], [53], [75], [93]. 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].

При выборе пылеулавливающих аппаратов и расчета их эффективности, необходимо учитывать основные свойства пыли, для некоторых видов оборудования и материалов данные приведены в табл. 1.5 [98].

Таблица 1.5

Характеристика свойств пыли для подбора пылеулавливающих аппаратов

Наименование оборудования	Температура, °С	Запыленность воздуха, г/м ³
Склад цемента		
Силосы, загружаемые пневмотранспортом	50	15,0
Бункер приемный	30	25,0
Отделение приема, склад извести и отделение помола		
Питатель качающийся	Температура окружающей среды	5,0
Конвейер скребковый	То же	до 7,0
Конвейер скребковый (узел перегрузки с конвейера на конвейер)	»	до 7,0
Дробилка молотковая двухроторная (узлы загрузки и выгрузки)	»	до 50,0

Окончание табл. 1.5

Наименование оборудования	Температура, °С	Запыленность воздуха, г/м ³
Силосы, загружаемые пневмотранспортом	50	15,0
Бункер извести, загружаемый пневмотранспортом	50	25,0
Дозатор весовой непрерывного действия (для извести)	Температура окружающей среды	7,0
Мельница трубная (известь)	90	20
Бункер, загружаемый винтовым конвейером (молотая известь)	До 50	3,0

Для рассматриваемых в данной работе материалов может быть использован только сухой способ очистки аспирационного воздуха. При выборе пылеулавливающего оборудования необходимо предварительно решить вопрос о количестве ступеней очистки и типе пылеулавливающих аппаратов.

Количество ступеней очистки определяется концентрацией пыли в аспирационном воздухе, ее дисперсностью и эффективностью очистного оборудования. Для очистки аспирационного воздуха могут быть использованы следующие очистные аппараты (табл. 1.6), например [82], [98]:

- I ступень – циклоны типа ЦН 11, ЦН15;
- II ступень – рукавные фильтры, высоковакуумные фильтры.

Таблица 1.6

Рекомендуемые аппараты для очистки аспирационного воздуха

Наименование помещения	Наименование источника выделения вредных веществ	Объемы аспирационного воздуха, м ³ /ч	Концентрация пыли, г/м ³	Рекомендуемые аппараты
Склад цемента	Силосы цемента	По типоразмеру пневмонасосов	до 15,0	I ступень – циклоны ЦН-15; II ступень – рукавный фильтр типа ФР-И, ИВИРС
	Приемные бункеры цемента	По количеству одновременно работающих разгрузателей	10–15,0	Рукавные фильтры типа БФР
Отделение приема и склад извести	Питатели качающиеся, узлы перегрузки на скребковые конвейеры	850 1000	7,0	Рукавный фильтр типа ФР-И, ИВИРС
	Молотковая дробилка двухроторная	По технической документации	до 50,0	I ступень – циклоны ЦН-15; II ступень – рукавный фильтр типа ФР-И, ИВИРС
	Силосы извести	По типоразмеру пневмонасосов	до 15,0	I ступень – циклоны ЦН-15; II ступень – рукавный фильтр типа ФР-И, ИВИРС

1.3. Системы удаления пыли при производстве строительных материалов

Помольное отделение	Бункеры извести	По типу-размеру пневмонасосов	25–30,0	I ступень – циклоны ЦН-15; II ступень – рукавный фильтр типа ФР-И, ИВИРС
	Дозаторы извести	500–800	5,0–7,0	
	Мельница	3200–3500	20,0	I ступень – циклоны ЦН-15; II ступень – рукавный фильтр типа ФР-И, ИВИРС
	Установки гомогенизаторов	По типоразмеру пневмонасосов	15,0	I ступень – циклоны ЦН-15; II ступень – рукавный фильтр типа ФР-И
Смесе-приготовительное отделение	Бункеры цемента	По типоразмеру пневмонасосов	25,0–30,0	I ступень – циклоны ЦН-15; II ступень – рукавный фильтр типа ФР-И, ИВИРС
	Бункеры вяжущего	По типоразмеру пневмонасосов	25,0	I ступень – циклоны ЦН-15; II ступень – рукавный фильтр типа ФР-И, ИВИРС
	Дозатор вяжущего	По способу подачи материала	8,0	I ступень – циклоны ЦН-15

На рис. 1.17 и 1.18 приведены конструкции современных циклонов, на рис. 1.19 – современных рукавных фильтров.

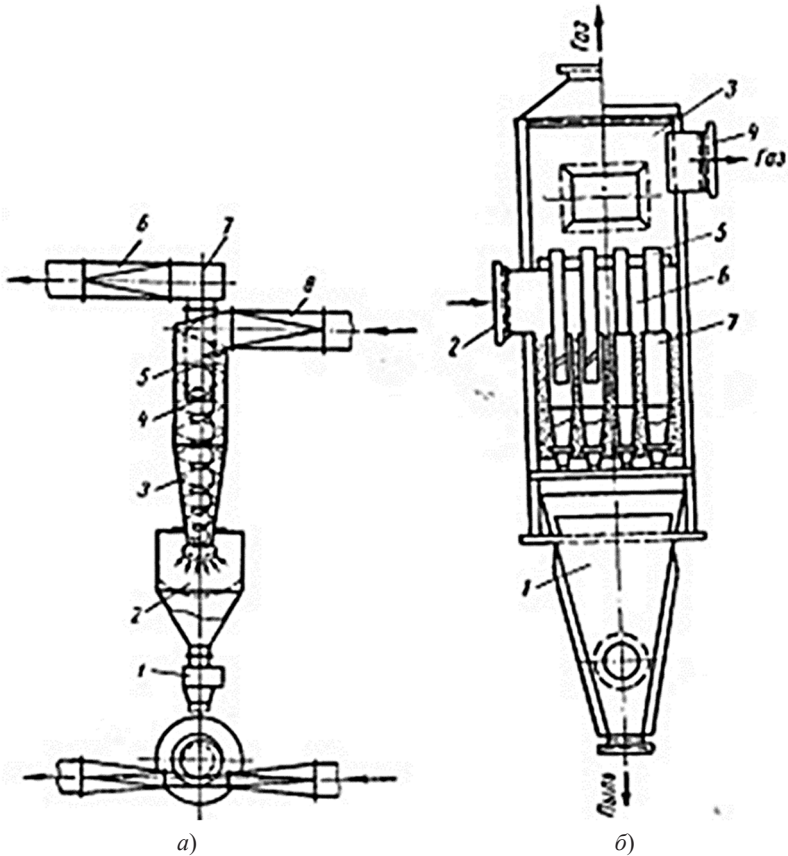


Рис. 1.17. Циклоны:

- а* – ЦН: 1 – затвор; 2 – бункер; 3 – коническая часть циклона; 4 – выпускная труба; 5 – цилиндрический корпус; 6 – выходной патрубок; 7 – улитка; 8 – входной патрубок; *б* – батарейный циклон: 1 – бункер; 2 – входной патрубок; 3 – камера очищенного газа; 4 – выходной патрубок циклона; 5 – выходной патрубок элемента; 6 – распределительная камера; 7 – циклонный элемент

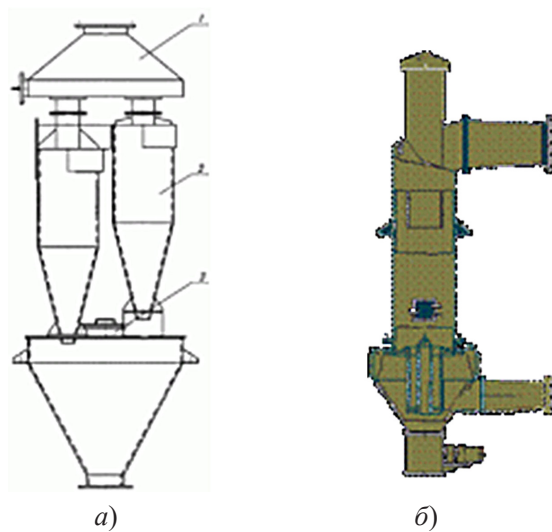


Рис. 1.18. Конструкции современных циклонов:
а – СЦН-40: 1 – сборник; 2 – циклон; 3 – бункер; б – ВЗП

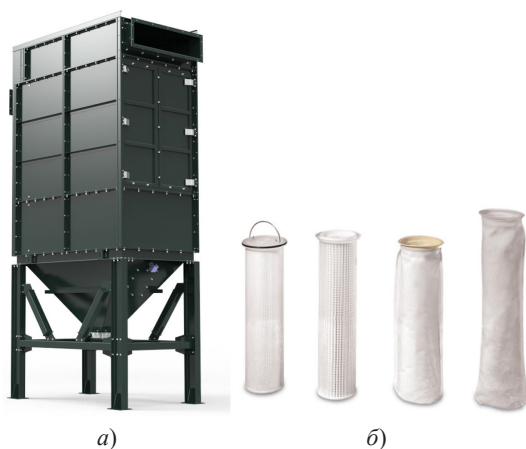


Рис. 1.19. Рукавные фильтры ФР-И:
а – общий вид; б – фильтрующие рукава

Циклоны ЦН предназначены для сухой очистки, в том числе аспирационного воздуха, и представляют собой самую многочисленную группу. Именно они чаще всего используются в промышленности, особенно при производстве строительных материалов, поскольку эти циклоны могут использоваться для безотходного производства. Циклоны ЦН не предназначены для работы в условиях взрывоопасных сред. Степень очистки газов зависит от размера частиц пыли, чем больше их размеры, тем эффективней очистка [120]. В зависимости от пропускной способности по воздуху (газу) и условий применения пылеуловители изготавливаются одиночного или группового исполнения – из двух, четырех, шести, восьми, десяти, двенадцати и четырнадцати циклонов. В обозначении циклона цифры, например, 15, обозначают угол наклона оси входного патрубка относительно горизонтали (град).

Помимо циклонов ЦН широко применяются высокоэффективные циклоны СЦН-40, предназначенные для эффективной очистки газов и аспирационного воздуха от мелкой и среднедисперсной пыли. Высокая степень очистки в циклоне СЦН-40 (см. рис. 1.18, а) достигнута за счет повышения интенсивности вращательного движения газа в корпусе циклона и одновременного снижения скорости радиального стока в направлении к выхлопной трубе. Циклоны меньше подвержены забиваемости и абразивному износу, просты в изготовлении и эксплуатации. Основные характеристики приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Производительность одиночных циклонов СЦН-40

Диаметр, мм	Производительность, м ³ /ч, при скорости		
	$V_n = 1,3$ м/с	$V_n = 1,6$ м/с	$V_n = 1,9$ м/с
СЦН-40-300	330	405	480
СЦН-40-400	590	720	860
СЦН-40-500	920	1130	1340

Окончание табл. 1.7

Диаметр, мм	Производительность, м ³ /ч, при скорости		
	$V_n = 1,3$ м/с	$V_n = 1,6$ м/с	$V_n = 1,9$ м/с
СЦН-40-600	1320	1630	1930
СЦН-40-700	1800	2215	2630
СЦН-40-800	2350	2890	3435
СЦН-40-900	2975	3660	4350
СЦН-40-1000	3670	4520	5370
СЦН-40-1200	5290	6510	7730

Циклоны ВЗП (табл. 1.8) предназначены для очистки от отходов воздуха, удаляемого системами аспирации и пневмотранспорта от технологического оборудования.

Таблица 1.8

Производительность циклонов ВЗП

Наименование	Производительность по воздуху, м ³ /ч	Масса, кг
ВЗП-100	141–254	65
ВЗП-150	254–572	100
ВЗП-200	565–1017	150
ВЗП-300	1272–2289	200
ВЗП-450	2861–5150	400
ВЗП-600	5087–9156	600
ВЗП-800	9044–16278	700
ВЗП-1100	17097–30775	1 200
ВЗП-1200	36173–65111	1 800

Эффективность работы пылеосадительного аппарата оценивается коэффициентом полезного действия (КПД) по пылеосаждению или степенью очистки газов формуле

$$\eta = \frac{G_2}{G_1} \cdot 100 \%, \quad (1.2)$$

где G_1 – количество пыли, поступившей в аппарат, кг; G_2 – количество уловленной аппаратом пыли, кг.

При разработке системы централизованной пневмопылеуборки следует руководствоваться [98]. В качестве побудителя тяги могут быть использованы вакуумные насосы типа ВВН (рис. 1.20). Схема системы пылеуборки приведена на рис. 1.21.

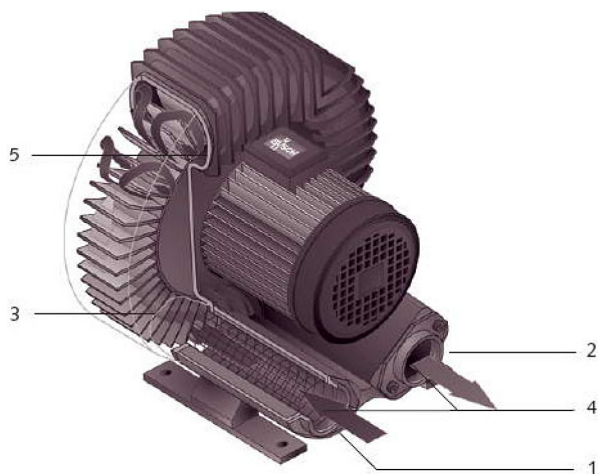


Рис. 1.20. Вихревой вакуумный насос:

- 1 – вход пылевоздушного потока; 2 – выход; 3 – рабочее колесо;
4 – глушитель; 5 – боковой канал

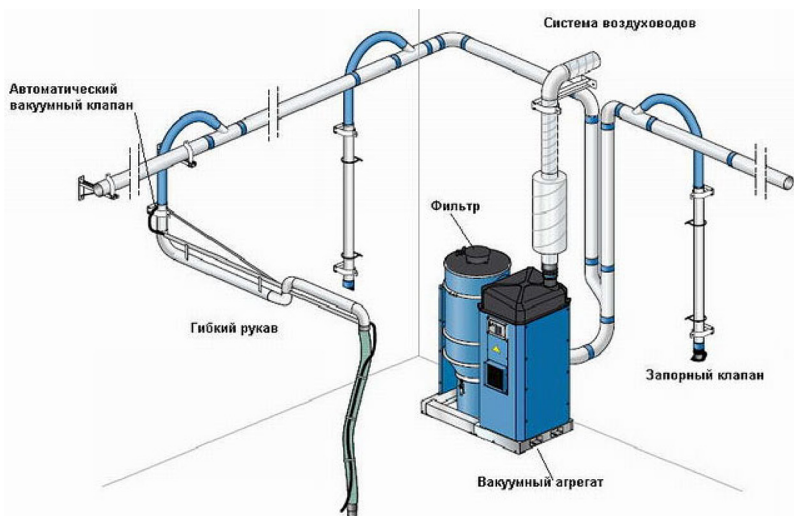


Рис. 1.21. Система пылеуборки

1.4. Методы расчета вентиляции в помещениях с пылевыделениями

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. Коузова, 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 А. Г. Сотникова [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, В. А. Минко [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. Ю. М. Кузнецовым [51] отмечено, что в механике насыпных грузов принята следующая классификация:

- крупнозернистые ($2 < a < 10$ мм);
- мелкозернистые ($0,5 < a < 2,0$ мм);
- порошкообразные ($0,05 < a \ll 0,5$ мм);

– 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 [96]:

$$\Delta p_{\text{в}} = 1,1\Delta p_c (1 + c\mu) + gh\mu' + p_{\text{д}}, \text{ Па}, \quad (1.3)$$

где Δp_c – потери давления в сети по чистому воздуху, Па; c – опытный коэффициент, зависящий от вида транспортируемого материала; μ – массовая концентрация, кг/кг; h – высота подъема транспортируемого материала, м; μ' – объемная концентрация смеси, кг/м³, равная отношению массового расхода транспортируемого материала $G_{\text{м}}$, кг/ч, к расходу воздуха $L_{\text{в}}$, м³/ч.

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

1.4.1. Скорости витания, трогания, транспортирования в аспирационных системах

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]–[45], [61], [70], [92], [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], [26], [44], [48], [51], [57], [92], [108], [109], [115] и др. В других работах скорость транспортирования на горизонтальных участках связывают со скоростью трогания [16], [17], [78], [92], [96].

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]

$$w_{\text{вит}} = 3,62 \sqrt{\frac{d \rho_{\text{ч}}}{c \rho_{\text{г}}}}, \text{ м/с.} \quad (1.4)$$

Многие исследователи [48], [57], [115] определили в своих экспериментах величину коэффициента сопротивления c и вывели аналитические зависимости для его нахождения, некоторые из которых представлены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Расчетные формулы, предлагаемые для определения коэффициента сопротивления c

Автор	Предлагаемая расчетная формула	Условия применения формулы	Источник литературы
Стокс	$c = \frac{24}{Re}$	$Re < 0,5$	[11]
Клячко Л. С.	$c = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}$	$3 < Re < 400$	[48]
Лобаев Б. Н.	$c = \frac{4,3}{(\lg Re)^2}$	$Re = 5 - 5 \cdot 10^5$	[57]
Успенский В. А.	$c = 0,54 + 0,447 \frac{d}{D}$	$\frac{d}{D} = 0,17 - 0,86$ $Re = 2,5 \cdot 10^3 - 1,3 \cdot 10^4$	[115]
Худяков Г. Н., Чуханов З. Ф.	$c = 1,4Re^{-0,18}$	$Re = 10^2 - 6 \cdot 10^2$	[44]
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. В. Сугак [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.

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 »:

$$c_{\text{действ}} = f(Re_{\text{ч}}; \frac{d}{D}; \frac{y}{R}; Re), \quad (1.5)$$

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 (1.4) диаметра эквивалентного шара $d_{\text{эkv}}$, объем которого равен объему данной частицы.

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

$$d_{\text{эkv}} = \frac{1,5V_{\text{ч}}c_{\text{ш}}}{S_{\text{ч}}c_{\text{ч}}}, \quad (1.6)$$

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] и Ю. М. Кузнецов [51] предлагают использовать в расчетах формулу

$$d_{\text{экв}} = \sqrt[3]{6V_{\text{ч}} / \pi}, \quad (1.7)$$

где $V_{\text{ч}}$ – объем частицы, м³.

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 $K_{\text{ф}}$ (или сферичности $K_{\text{сф}}$), равным отношению коэффициентов сопротивления данного тела и эквивалентного шара:

$$K_{\text{ф}} = S_{\text{ч}} / S_{\text{ш}}, \quad (1.8)$$

где $S_{\text{ч}}$, $S_{\text{ш}}$ – соответственно, площадь поверхности реальной частицы и шарообразной частицы, имеющий тот же объем, м².

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

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 табл. 1.10.

Таблица 1.10

Геометрические коэффициенты для частиц различных материалов

Материал	Кажущаяся плотность частицы, кг/м ³	Преобладающая форма частиц	K_{ϕ}	$K_{\text{сф}}$
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

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

$$w_{\text{внт}} = K_{\text{внт}} \sqrt{\frac{G_{\text{м}}}{S_{\text{м}} \rho_{\text{г}}} \left(1 - \frac{S_{\text{м}}}{0,785 D^2} \right)}, \quad (1.9)$$

где $K_{\text{внт}}$ – 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, м².

Различными исследователями [26], [48], [51], [57], [92], [108], [107], [115] получены аналитические зависимости для определения скорости витания частиц шарообразной и произвольной формы, некоторые из них приведены в табл. 1.11.

Таблица 1.11

Расчетные формулы для определения скорости витания частиц шарообразной и произвольной формы

Автор	Предлагаемая расчетная формула для определения скорости витания	Условия применения формулы	Источник
Гринев К. М.	$w_{\text{внт}} = 5,7 \sqrt{d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}}}}$	$Re = 5000$ $C = 0,39$	[27]
Страхович К. И.	$w_{\text{внт}} = 5,0 \sqrt{d \rho_{\text{ч}}}$	–	[109]
Клячко Л. С.	$w_{\text{внт}} = 4,7 \sqrt{d \rho_{\text{ч}}}$	$Re < 1000$	[48]
Спиваковский А. О.	$w_{\text{внт}} = \sqrt{28,4d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}}}}$	–	[108]
Роганов Б. И. Калинушкин М. П.	$w_{\text{внт}} = 3,62 \sqrt{d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}}}}$	–	[44]
Лобаев Е. Н.	$w_{\text{внт}} = 1,745 \sqrt{d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}}} \lg Re}$	$Re = 5 - 5 \cdot 10^5$	[57]
Полушкин В. И.	$w_{\text{внт}} = \sqrt{\frac{4gd\rho_{\text{ч}}}{3c_D\rho_{\text{г}}}}$	$10 < Re < 10^4$ $c_D = 0,47$ $Re > 10^4$ $c_D = 0,2$	[92]
Успенский В. А. Кузнецов Ю. М.	$w_{\text{внт}} = \sqrt{\frac{4gd(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}})}{3c_D\rho_{\text{г}}}}$	$800 < Re < 2 \cdot 10^5$ $c_D = 0,48$	[115], [51]
Жихарев Е. А.	$w_{\text{внт}} = 3,62 \sqrt{\frac{d \rho_{\text{ч}}}{c \rho_{\text{г}}}}$	–	[38]

Из изложенного 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], [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 % 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 проч.).

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 также 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 табл. 1.12.

Таблица 1.12

Расчетные зависимости для скорости трогания

Автор	Полученная зависимость	Примечание	Источник
Воскресенский В. Е.	$w_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{2G}{\rho F_{\text{ч}} c_{\text{ч}}}}$	для одиночных частиц	[17]
Полушкин В. И.	$w_{\text{тр}} = w_{\text{внт}} \left[1 + \left(K_{\text{п}} + \bar{a}^2 \pi / 4 \right) \right] \bar{\rho}_{\text{ч}} \bar{d}_{\text{ч}}$	–	[92]
Надеин А. А.	$w_{\text{тр}} = \sqrt{2 / 3 f_{\text{тр}} dg (\rho_{\text{ч}} - \rho) / (\rho (c / 2 - f_{\text{тр}}))}$	при Re = 200–400	[78]
Тодес О. М.	$\text{Re}_{\text{тр}} = \text{Ar} f'_{\text{тр}} / \left(18 + 0,61 \sqrt{\text{Ar} f'_{\text{тр}}} \right)$	где $\text{Re}_{\text{тр}} = \frac{\rho_{\text{г}} d_{\text{экв}} w_{\text{тр}}}{\mu}$	[78]
Воронин Ю. Б.	$w_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{2G}{\rho S_{\text{ч}} c_{\text{ч}}} + N \mu^n}$	для частиц с учетом геометрических размеров, коэффициентов сопротивления и концентрации	[16]
Торговников Б. М.	$w_{\text{тр}} = 1,3 \sqrt[3]{\rho_{\text{ч}}}$	при $\mu \geq 0,01$	[96]

Скорость витания и скорость трогания не определяют ту скорость, с которой должны перемещаться твердые тела в системе пневматического транспорта. Для этого используют скорость транс-

портирования 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

$$w_t = aw_{\text{вит}}, \text{ м/с}, \quad (1.10)$$

где a – коэффициент запаса.

Данные ряда авторов по взаимосвязи этих скоростей сведены в табл. 1.13.

Как видно из таблицы 1.13, 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

$$w_t = 1,1 \left(4\mu \frac{w}{w_m} + 0,01\rho_m + b \right), \text{ м/с}, \quad (1.11)$$

где ρ_m – плотность древесины транспортируемых частиц, кг/м^3 ; $\frac{w}{w_m}$ – коэффициент опережения скорости воздушного потока по отношению к скорости материала; b – коэффициент формы и размеров частиц (принимается по табл. 1.14).

Таблица 1.13

Зависимость скорости транспортирования от скорости витания для различных материалов

Автор	Материал	Рекомендуемое значение коэффициента a	Примечание	Источник
Казаков А. П.	Зерно	1,25–1,3 1,5 2,5–2,8	при $\mu < 1,0$ $\mu < 2,0$ $\mu = 10 - 5$	[42]
Калинушкин М. П. Орловский З. Э.	Строительные материалы	1,1–1,2	для вертикальных и горизонтальных участков с подстилающим слоем	[44]
Калинушкин М. П. Орловский З. Э.	Строительные материалы	1,3–1,4	для горизонтальных участков без подстилающего слоя	[44]
Солопов С. Г. Горцакалян Л. О.	Гранулированный торф	2,0	$w_{\text{внт}} = 4 - 8 \text{ м/с}$	[102]
Жихарев Е. А.	Зернистые материалы	2,0	$Re = 3 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$	[38]

Таблица 1.14

Коэффициенты для определения транспортирующей скорости

Транспортируемый материал	Параметр b	Параметр w / w_m
Опилки: мелкие крупные	7 8	1,11 1,18
Стружка: мелкая крупная	9 10	1,18 1,25
Сортировочная технологическая щепы (длина частиц до 35 мм)	11	1,43
Крупная несортированная щепы, (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 [16]:

$$w_T = \sqrt{500 + N\mu^{0,6}d^{0,5}}, \text{ м/с}, \quad (1.12)$$

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 μ) 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 [92]:

$$w_T = w_B \left(1,5 + \frac{K + \frac{\bar{a}^2}{4}}{\bar{\rho}_q \bar{d}} \right)^2, \text{ м/с}, \quad (1.13)$$

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 [92]

$$w_{T,M} = w_T (1 + \mu), \text{ м/с}. \quad (1.14)$$

Расчет скорости проводился для прямолинейных участков сети. В фасонных 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 [92], 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:

$$w_t = bw_{тр}, \text{ м/с}, \quad (1.15)$$

где b – постоянный коэффициент.

В работах [42], [44], [61] предложена формула, представляющая практический интерес и позволяющая выбирать расчетную скорость транспортирования без предварительного определения скорости трогания

$$w_t = a\sqrt{\rho_m} + BL_{пр}^2, \text{ м/с}, \quad (1.16)$$

где a – коэффициент, учитывающий крупность частиц сыпучего материала, принимается из табл. 1.15; ρ_m – плотность материала, т/м³; 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; $L_{пр}^2$ – приведенная длина транспортирования с учетом замены сопротивлений в коленах, разгрузителях и т. п. эквивалентной длиной прямолинейного трубопровода.

Таблица 1.15

Значения коэффициента a

Род материала	Крупность частиц, мм	a
Пылевидный	0–1	10–16
Зернистый однородный	1–10	16–20
Мелкокусковой	10–20	20–22
Среднекусковой	40–80	22–25

Формула (1.15) рекомендуется для частиц размером до 80 мм. Кроме того, формула 1.15 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

$$w_T = \frac{G_M}{\mu' S_0}, \quad (1.17)$$

где G_M – расход материала, кг/с; S_0 – площадь сечения трубы, м².

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 u_T выбирать по этим участкам.

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

$$D_{\text{верт}} = D_{\text{гор}} \sqrt{\frac{w_T}{w_T + w_{\text{виг}}}}, \text{ м.} \quad (1.17)$$

Скорость в вертикальном воздуховоде Б. М. Торговников [96] предложил определять по формуле

$$w_{\text{верт}} = w_T = w_{\text{виг}}, \text{ м/с.} \quad (1.18)$$

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

$$w_{\text{м}} = w - w_{\text{вит}}. \quad (1.19)$$

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

$$w_{\text{м}} = cw. \quad (1.20)$$

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 μ и объемную μ' концентрацию, понимая под этим отношение весов или объемов транспортируемого материала (G_M и L_M) и транспортирующего воздуха (G_B и L_B) за единицу времени, т. е.:

$$\mu = \frac{G_M}{G_B}; \mu' = \frac{L_M}{L_B}. \quad (1.21)$$

Объемную концентрацию можно выразить через массовую

$$\mu' = \mu \frac{\rho_B}{\rho_M}. \quad (1.22)$$

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].

При движении в воздушном потоке не отдельных частиц, а реальных материалов с увеличением концентрации смеси μ происходят снижение скорости частиц материала w_c и их выпадение из воздушного потока на дно трубы [17].

А. А. Надеин [78] также 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 μ 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 μ_d , т. е. 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

$$\mu_d = \frac{M_m}{lS\rho_v}. \quad (1.23)$$

Действительная концентрация смеси всегда больше весовой концентрации и может быть выражена как

$$\mu_d = \mu \frac{w}{w_q}. \quad (1.24)$$

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.

Приведенное выражение для определения действительной концентрации смеси (1.24) еще раз указывает на необходимость изучения относительной скорости движения материала $C = \frac{w_q}{w}$. 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

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] 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 горизон-

тальным 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, как отмечено в работе [64], поддержал Б. Ф. Турицын, 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. Некоторые исследователи [34] считают, 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. Также считают, 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 уравнивается 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

$$K_{\Pi} = \frac{(w_r \sin E_r)^2}{gR \cos \beta}, \quad (1.25)$$

где E_r – угол скоса движения твердой частицы; R – радиус поперечного сечения трубы, м; β – 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 [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 проч.), а также характеристикой транспортируемого материала (размером, формой, состоянием поверхности частиц и проч.). 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, В. Е. Воскресенский [17] считает, что наклонные участки

трубопроводов с углом наклона к горизонту более 60° следует рассматривать как вертикальные, с углом до 60° – как горизонтальные.

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

Как отмечается в работах [103]–[105], влияние угла наклона труб на аэродинамические характеристики двухфазного потока воздуха с твердыми примесями изучено недостаточно. На рис. 1.22 [110] приведены некоторые экспериментальные данные о влиянии наклона труб на условия пневмотранспорта зерен.

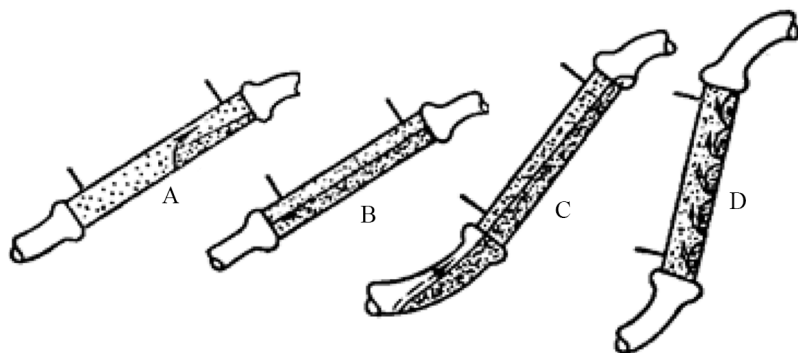


Рис. 1.22. Характер осаждения твердых частиц при различных наклонах трубопровода и скоростях потока

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 рис. 1.23, отличается разнообразием. Стрелками показано направление движения частиц.

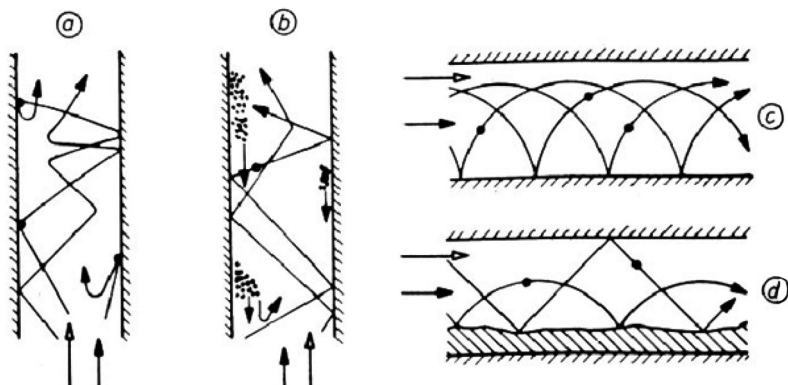


Рис. 1.23. Схемы движения частиц в вертикальном (*a, b*) и горизонтальном (*c, d*) трубопроводах

На рисунке схема *a*) соответствует углу наклона $22,5^\circ$ и скорости движения воздуха $5,2\text{--}5,5$ 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 $3,0\text{--}4,6$ 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° , 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 [136] схемы движения частиц в вертикальном и горизонтальном трубопроводах (см. рис. 1.23). 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 (см. рис. 1.23, *a*). Но даже в этом случае возможно отделение частиц и движение их вниз (см. рис. 1.23, *b*). В случае горизонтального трубопровода (см. рис. 1.23, *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 рис. 1.24.

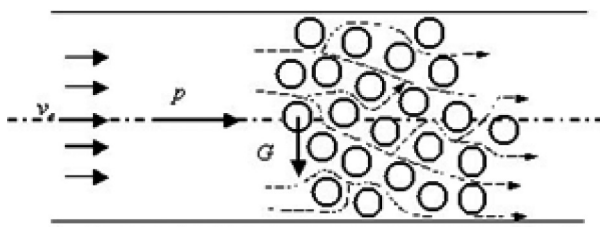


Рис. 1.24. Движение твердых частиц в горизонтальной трубе

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

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

1.5. Выводы

1. Анализ работ в области аспирации и пневмотранспорта предприятий, технологический процесс которых связан с перемещением сыпучих материалов, в том числе предприятий по производ-

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

4. В результате указанных 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 Ю. М. Кузнецова [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 гл. 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], [92], [108], [109], [115] и др. Для определения скорости витания твердых частиц использовались экспериментальные установки, имеющие общие конструктивные особенности, например, такие, как вертикальные воздухопроводы [17], [54], [58].

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

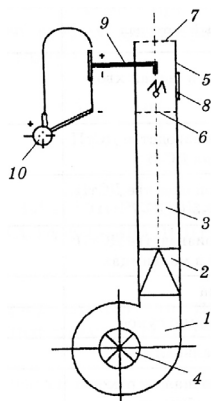


Рис. 2.1. Схема установки для определения скорости витания частиц материала [17]

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 рис. 2.2, предложена для проведения учебного процесса [54].

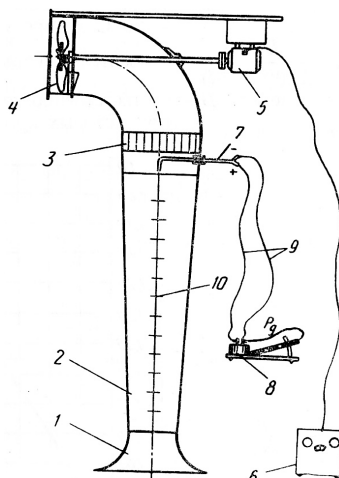


Рис. 2.2. Схема стенда для определения скорости витания [53]

Установка состоит: из прозрачной трубы витания 2 с углом конусности 3° . 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 аэро-

динамическую характеристику частиц измерением скорости витания на экспериментальной установке (рис. 2.3).

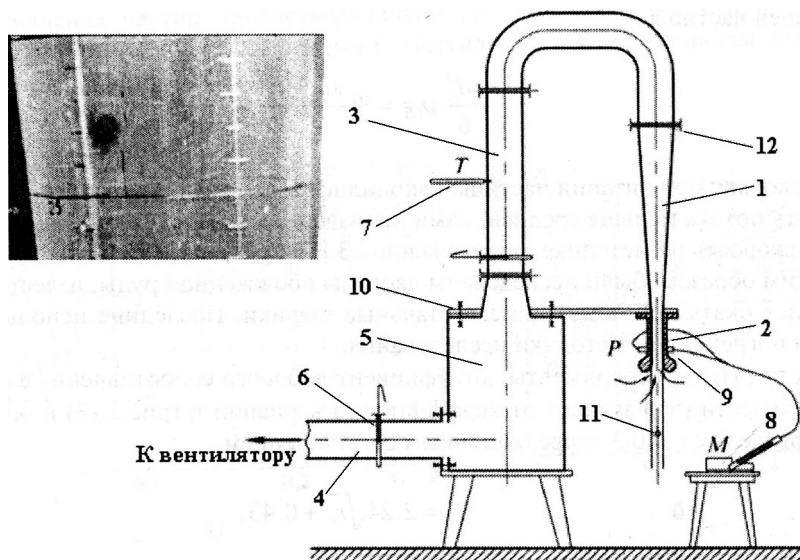


Рис. 2.3. Схема экспериментальной установки для исследования витания твердых частиц [58]: 1 – коническая труба; 2 – измерительный коллектор; 3, 4 – воздуховоды; 5 – камера; 6 – шибер; 7 – термометр; 8 – микроманометр; 9 – штуцеры; 10 – кронштейны; 11 – отвес; 12 – решетка

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

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 (рис. 2.4);
- скоростей транспортирования монодисперсного материала по наклонному и горизонтальному трубопроводу.

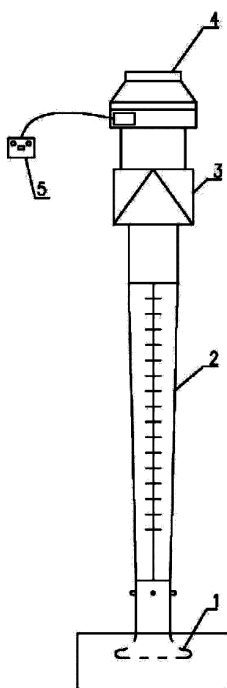


Рис. 2.4. Схема экспериментальной установки для определения скорости витания: 1 – коллектор входной; 2 – труба витания с прозрачным участком для наблюдений; 3 – фильтр; 4 – вентилятор; 5 – лабораторный автотрансформатор

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° использовано координатное устройство. 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, $\text{м}^3/\text{ч}$ – 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 «Артос» 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 (рис. 2.5), обеспечивающим за собой равномерное поле скоростей, внутренний профиль которого очерчен по лемнискате Бернулли, измеряется статическое давление.

Измерение средней скорости воздуха по коллектору, w , м/с, производится следующим образом (рис. 2.6). Статическое давление больше динамического в этом сечении 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 $w = \sqrt{\frac{p \cdot 2}{1,04 \rho}}$, и если $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, то $w = 1,27 \sqrt{p}$.

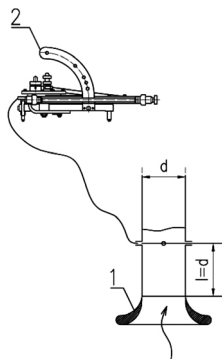


Рис. 2.5. Измерение средней скорости по коллектору:
1 – коллектор входной, 2 – микроманометр



Рис. 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 воздухопровод был смонтирован из отдельных труб: $d = 100$ мм, $d = 160$ мм и конусной части (труба витания 2 с углом конусности 3° , 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 конус нанесена шкала с указанием диаметров воздухопровода, 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/м³.

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 [26] (табл. 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, соответствующее этой скорости для условий опытной установки.

2. После включения установки выполнено регулирование потока воздуха до достижения величины статического давления по п. 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 (разд. 2.3) в следующей последовательности.

1. В коническую трубу вводятся твердые частицы.

2. Визуально через прозрачный участок трубопровода (рис. 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.

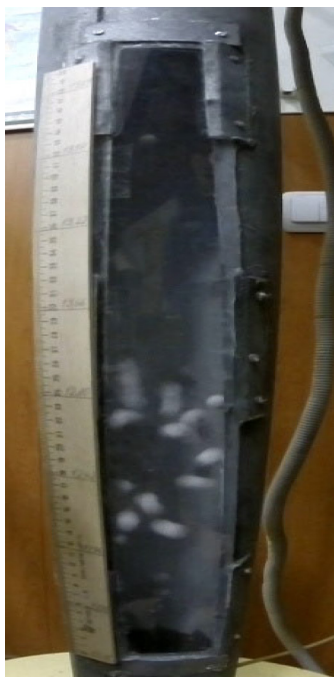


Рис. 2.7. «Зависание» положение материала

Эксперименты проводились с материалами, предоставленными кафедрой технологии строительных материалов и метрологии

СПбГАСУ: тяжелый бетон плотностью 2300 кг/м^3 , мелкозернистый бетон плотностью 2200 кг/м^3 , легкий бетон плотностью 1500 кг/м^3 , газобетон плотностью 800 кг/м^3 и пенобетон плотностью 400 кг/м^3 . Подготовка материала заключалась в механическом измельчении блоков из ячеистого бетона. Первичное измельчение – дробление в щековой дробилке ДЩ 80×150 , 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 (рис. 2.8). Кроме того, вручную производилась незначительная дошлифовка частиц. В результате был получен готовый к проведению опытов монодисперсный материал соответствующих фракций.



Рис. 2.8. Монодисперсный материал

Как уже отмечалось, проблеме определения скорости витания одиночной твердой частицы посвящено значительное количество

работ, в частности [12], [16], [26], [44], [48], [51], [57], [92], [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 участок, 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/м³; вторая – для одной частицы диаметром 5 мм с различной плотностью: 2300 кг/м³, 2200 кг/м³, 1500 кг/м³, 800 кг/м³, 400 кг/м³.

Результаты исследований скорости витания при различных диаметрах частиц приведены в табл. А.1 прил. А. В каждой серии экспериментов проведены по три параллельных измерения (табл. А.3 прил. 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 арифметически и результатами параллельных измерений $(w_i - \bar{w})^2$. Далее найдены дисперсии воспроизводимости параллельных измерений при числе степеней свободы $f = n - 1$; $f = 3 - 1 = 2$

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

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

Из табл. А.3 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 [26] по формуле (табл. 1.6) $(w_{\text{вит}} - w_{\text{рч}})^2$, 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 (табл. 1.6) [26], [44], [48], [51], [57], [92], [108], [108], [115] (рис. 2.9).

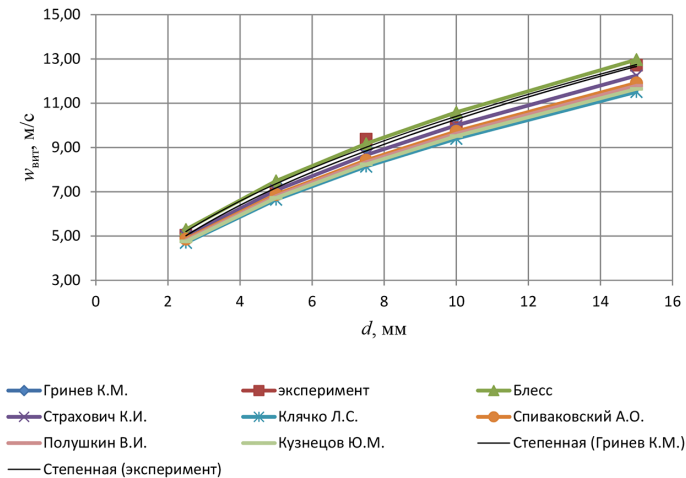


Рис. 2.9. Зависимости скорости витания от диаметра частицы

Результаты исследований скорости витания для одиночной частицы диаметром 5 мм с различной плотностью 2300 кг/м³, 2200 кг/м³, 1500 кг/м³, 800 кг/м³, 400 кг/м³ представлены в табл. А.2 прил. А. Обработка экспериментальных данных аналогична исследованиям скоростей витания при различных диаметрах частиц. Сумма дисперсии воспроизводимости составила

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

Однородность дисперсий определена по формуле (2.3) $G_{\text{оп}} = \frac{1,2584}{2,9355} = 0,4287$, что меньше критического значения Кохрена $G_{\text{кр}} = 0,516$. Средняя дисперсия воспроизводимости определена по формуле (2.4) $S_e^2 = \frac{2,9355}{5} = 0,5871$. Для оценки адекватности определено опытное значение критерия Фишера по формуле (2.6) $F_{\text{оп}} = \frac{0,6248}{0,5871} = 1,06$, при этом в числителе приведена сумма квадратов разности, определенная по формуле (2.5) $S_{le}^2 = \frac{3 \cdot 0,8331}{4} = 0,6248$. Опытное значение критерия Фишера меньше критического (3,48); таким образом, доказана адекватность экспериментальных данных результатам расчетов.

На рис. 2.10 приведены результаты исследований влияния плотности частицы в диапазоне от 400 до 2300 кг/м³ на скорость витания твердой частицы. Доказана адекватность экспериментальных данных результатам расчетов по формулам табл. 1.6 [26], [44], [48], [51], [57], [92], [108], [115].

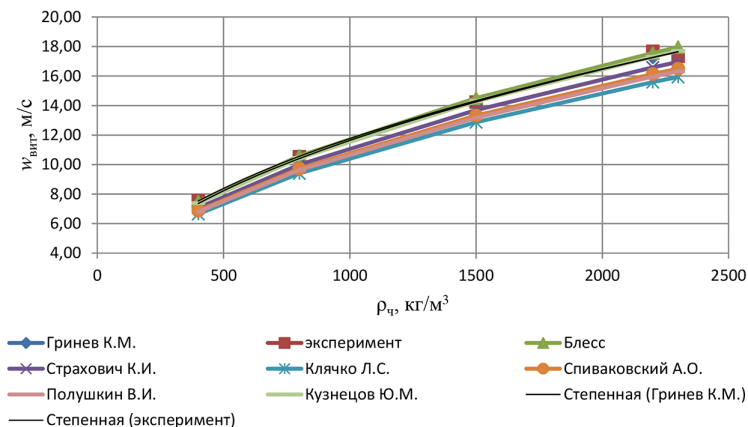


Рис. 2.10. Зависимость скорости витания от плотности частицы

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/м³) 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/м³.

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 табл. 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 ³	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 ρ , d , μ – интервалы изменения значений факторов.

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

Составлена матрица планирования полного трехфакторного эксперимента (табл. 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 дисперсности воспроизводимости измерений в каждой точке и серии опытов производилась по известным методам обра-

ботки экспериментальных данных [2], [56], [60], [119]. Результаты расчетов заносим в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты эксперимента

№ опыта	Параллельные измерения			\bar{y}	$(y_1 - \bar{y})^2$	$(y_2 - \bar{y})^2$	$(y_3 - \bar{y})^2$	$S_y^2 y_1$
	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

2.4. Обработка экспериментальных данных

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

$$y = b_0 = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (2.8)$$

Рассчитываем значения коэффициентов регрессии по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{m}, \quad (2.9)$$

где x_i – знак фактора в соответствующем ему столбце (см. табл. 2.2).

Определяем значимость коэффициентов регрессии, вычислив

$$\text{среднюю дисперсию воспроизводимости } S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 S_i^2}{m} = \frac{0,3011}{8} = 0,0376$$

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

Находим опытные значения t -критерия по выражению

$$t_{\text{оп}} = \frac{|b_i|}{\sqrt{S^2(b)}}, \quad (2.10)$$

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

Результаты расчетов заносим в табл. 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

Получаем уравнение регрессии

$$y = 9,76 + 0,65x_1 + 2,88x_2 - 1,20x_3 + 0,09x_1x_2 + 0,56x_1x_2 - 0,56x_2x_3 + 0,018x_1x_2x_3. \quad (2.11)$$

Экспериментальное значение t -критерия для совместного действия факторов x_1x_2 и $x_1x_2x_3$ (см. табл. 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. Окончательно уравнение регрессии принимает вид

$$\hat{y} = 9,76 + 0,65x_1 + 2,88x_2 - 1,20x_3 + 0,56x_1x_3 - 0,56x_2x_3. \quad (2.12)$$

Из уравнения 2.12 и рис. 2.11 видно, что на величину скорости витания наибольшее влияние оказывает размер частиц. 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 табл. 2.5.

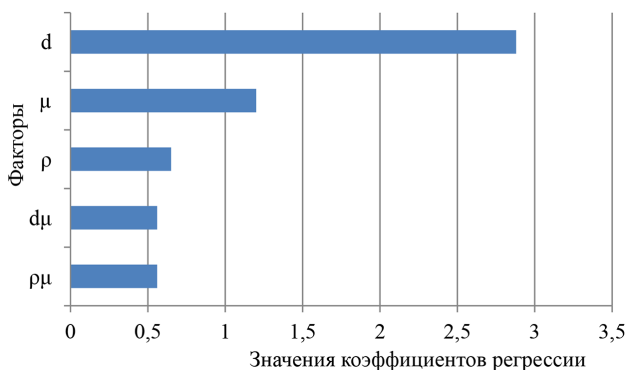


Рис. 2.11. Диаграмма значимости отдельных членов уравнения для нахождения скорости витания

С использованием данных табл. 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 $F_{кр}$:

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

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

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

Выполняем раскодирование факторов и получаем зависимость для определения скорости витания частиц рассмотренных материалов

$$w_{виг} = 5,42 - 2,37 \cdot 10^{-4} \rho_{\text{ч}} + 955,98d - 5,86\mu + 8,46 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{ч}} \mu - 454,11d\mu. \quad (2.13)$$

Определим скорость витания для следующих значений параметров частиц: $d = 0,0025$ м; $\rho = 400$ кг/м³; $\mu = 0,083$ кг/кг:

2.4. Обработка экспериментальных данных

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

что соответствует экспериментальным данным в табл. 2.5.

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

Таблица 2.6

Зависимость скорости витания от массовой концентрации

Номер опыта	Плотность частиц, ρ_p , кг/м ³	Диаметр частиц, d , мм	Зависимости																											
1	400	2,5	<p>Данные для графика 1:</p> <table border="1"> <tr><th>μ, кг/кг</th><th>W_{виг}, м/с</th><th>Тип</th></tr> <tr><td>0,1</td><td>7,2</td><td>расчет</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>6,8</td><td>эксперимент</td></tr> <tr><td>0,25</td><td>6,8</td><td>расчет</td></tr> <tr><td>0,35</td><td>6,2</td><td>эксперимент</td></tr> <tr><td>0,4</td><td>6,4</td><td>расчет</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>5,6</td><td>расчет</td></tr> </table>	μ, кг/кг	W _{виг} , м/с	Тип	0,1	7,2	расчет	0,2	6,8	эксперимент	0,25	6,8	расчет	0,35	6,2	эксперимент	0,4	6,4	расчет	0,6	5,6	расчет						
μ, кг/кг	W _{виг} , м/с	Тип																												
0,1	7,2	расчет																												
0,2	6,8	эксперимент																												
0,25	6,8	расчет																												
0,35	6,2	эксперимент																												
0,4	6,4	расчет																												
0,6	5,6	расчет																												
2	400	5	<p>Данные для графика 2:</p> <table border="1"> <tr><th>μ, кг/кг</th><th>W_{виг}, м/с</th><th>Тип</th></tr> <tr><td>0,05</td><td>9,6</td><td>эксперимент</td></tr> <tr><td>0,05</td><td>9,8</td><td>расчет</td></tr> <tr><td>0,15</td><td>9,1</td><td>эксперимент</td></tr> <tr><td>0,15</td><td>9,4</td><td>расчет</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>8,9</td><td>эксперимент</td></tr> <tr><td>0,25</td><td>8,8</td><td>расчет</td></tr> <tr><td>0,35</td><td>8,3</td><td>эксперимент</td></tr> <tr><td>0,35</td><td>8,6</td><td>расчет</td></tr> </table>	μ, кг/кг	W _{виг} , м/с	Тип	0,05	9,6	эксперимент	0,05	9,8	расчет	0,15	9,1	эксперимент	0,15	9,4	расчет	0,2	8,9	эксперимент	0,25	8,8	расчет	0,35	8,3	эксперимент	0,35	8,6	расчет
μ, кг/кг	W _{виг} , м/с	Тип																												
0,05	9,6	эксперимент																												
0,05	9,8	расчет																												
0,15	9,1	эксперимент																												
0,15	9,4	расчет																												
0,2	8,9	эксперимент																												
0,25	8,8	расчет																												
0,35	8,3	эксперимент																												
0,35	8,6	расчет																												
3	400	10	<p>Данные для графика 3:</p> <table border="1"> <tr><th>μ, кг/кг</th><th>W_{виг}, м/с</th><th>Тип</th></tr> <tr><td>0,2</td><td>12,8</td><td>эксперимент</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>12,8</td><td>расчет</td></tr> <tr><td>0,4</td><td>11,8</td><td>расчет</td></tr> <tr><td>0,7</td><td>10,2</td><td>эксперимент</td></tr> <tr><td>0,7</td><td>10,2</td><td>расчет</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>7,8</td><td>расчет</td></tr> <tr><td>1,4</td><td>5,8</td><td>эксперимент</td></tr> <tr><td>1,4</td><td>5,8</td><td>расчет</td></tr> </table>	μ, кг/кг	W _{виг} , м/с	Тип	0,2	12,8	эксперимент	0,2	12,8	расчет	0,4	11,8	расчет	0,7	10,2	эксперимент	0,7	10,2	расчет	1,0	7,8	расчет	1,4	5,8	эксперимент	1,4	5,8	расчет
μ, кг/кг	W _{виг} , м/с	Тип																												
0,2	12,8	эксперимент																												
0,2	12,8	расчет																												
0,4	11,8	расчет																												
0,7	10,2	эксперимент																												
0,7	10,2	расчет																												
1,0	7,8	расчет																												
1,4	5,8	эксперимент																												
1,4	5,8	расчет																												

Окончание табл. 2.6

Номер опыта	Плотность частиц, $\rho_{\text{ч}}$, кг/м ³	Диаметр частиц, d , мм	Зависимости
4	800	2,5	<p> $W_{\text{вирт}}$, м/с μ, кг/кг ◆ эксперимент ■ расчет </p>
5	800	5	<p> $W_{\text{вирт}}$, м/с μ, кг/кг ◆ эксперимент ■ расчет </p>

Анализ результатов табл. 2.6 показывает, что с увеличением массовой концентрации скорость витания частиц уменьшается. По данным планового эксперимента получены рекомендуемые скорости витания для различных материалов для $\rho_{\text{ч}} = 200\text{--}900$ кг/м³ и $\mu = 0,1\text{--}1,4$ кг/кг, которые приведены в табл. А.6.

Эти результаты могут быть использованы при расчете [64] вакуумных систем обеспыливания с частицами наиболее распространенных сыпучих строительных материалов (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Сыпучие строительные материалы

Строительный материал	Плотность, кг/м ³
Гравий керамзитовый	200; 300; 350; 400; 450; 500; 600; 700
Гравий шунгизитовый (ГОСТ 9755)	400; 450; 500; 600; 700
Щебень шлакопемзовый и аглопоритовый (ГОСТ 9757)	400; 450; 500; 600; 700; 800
Пористый гравий с остеклованной оболочкой из доменного и ферросплавного шлаков (ГОСТ 25820)	400; 500; 600; 700
Щебень и песок из перлита вспученного (ГОСТ 10832)	300; 350; 400; 500
Вермикулит вспученный (ГОСТ 12865)	200
Бетон на литоидной пемзе	800
Бетон на вулканическом шлаке	800
Керамзитобетон на керамзитовом песке	500; 600; 800
Керамзитобетон на кварцевом песке с умеренной поризацией	800
Керамзитобетон на перлитовом песке	800
Керамзитобетон беспесчаный	300; 400; 500; 600; 700
Перлитобетон	600; 800
Вермикулитобетон	300; 400; 600; 800
Полистиролбетон на портландцементе (ГОСТ Р 51263)	150; 200; 250; 300; 350; 400; 500; 600
Полистиролбетон модифицированный на шлакопортландцементе	200; 300; 400; 500
Газопенобетон на цементном вяжущем	400; 600; 800; 1000

Строительный материал	Плотность, кг/м ³
Газопенобетон на известняковом вяжущем	500; 600; 800; 1000
Газо- и пенозолобетон на цементном/вяжущем	800; 1000
Известняк	1400; 1600; 1800; 2000

На рис. 2.12 представлены трехмерные зависимости скорости витания от концентрации и размера частиц при плотности материала $\rho = 200$ кг/м³ (а), $\rho_{\text{ч}} = 300$ кг/м³ (б), $\rho_{\text{ч}} = 400$ кг/м³ (в), $\rho_{\text{ч}} = 500$ кг/м³ (г), $\rho_{\text{ч}} = 600$ кг/м³ (д), $\rho_{\text{ч}} = 700$ кг/м³ (е), $\rho_{\text{ч}} = 800$ кг/м³ (ж), $\rho_{\text{ч}} = 900$ кг/м³ (з), полученные на основании регрессионного анализа.

При построении зависимостей использованы принципы, изложенные в работе Pandelidis D., Anisimov S. [132]. 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/м³ (а), $\rho_{\text{ч}} = 300$ кг/м³ (б), $\rho_{\text{ч}} = 400$ кг/м³ (в), $\rho_{\text{ч}} = 500$ кг/м³ (г), $\rho_{\text{ч}} = 600$ кг/м³ (д), $\rho_{\text{ч}} = 700$ кг/м³ (е), $\rho_{\text{ч}} = 800$ кг/м³ (ж), $\rho_{\text{ч}} = 900$ кг/м³ (з).

Изучению движения твердых частиц в газообразной среде посвящен ряд работ, связанных с процессами осаждения, в частности В. В. Кафаровым [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 ($500 < Re < 2 \cdot 10^5$) $c = 0,43$ (табл. 1.4) и критериальная зависимость, описывающая начало режима осаждения твердой частицы:

$$cRe^2 = \frac{4}{3} Ar. \quad (2.14)$$

2.4. Обработка экспериментальных данных

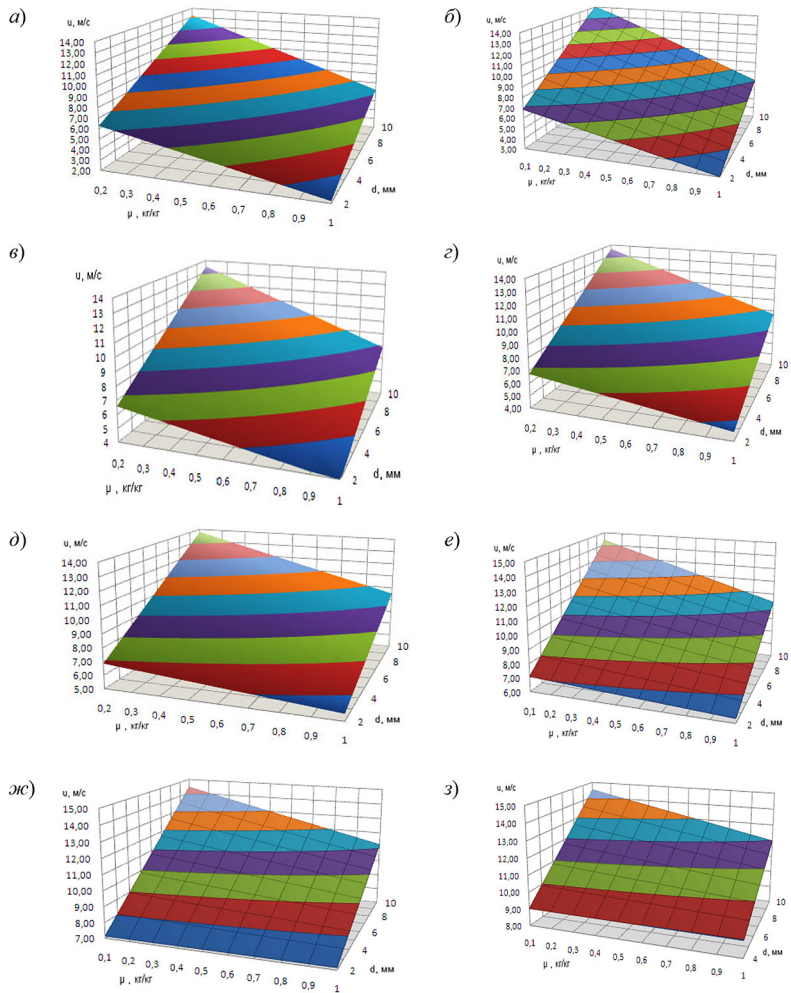


Рис. 2.12. Трехмерные зависимости скорости витания от концентрации и размера при плотности материала:

$\rho_{\text{ч}} = 200 \text{ кг/м}^3$ (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)

При $c = 0,43$ уравнение примет вид

$$Re = 1,74Ar^{0,5}. \quad (2.15)$$

Критерий Архимеда определен по формуле

$$Ar = \frac{gd_q^3 \rho_q - \rho}{v^2 \rho}, \quad (2.16)$$

где ρ – плотность воздуха, $кг/м^3$.

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

$$Re_k = f(Ar, \mu). \quad (2.17)$$

Для шарообразных частиц получено критериальное уравнение в виде

$$Re_k = 1,74Ar^{0,5} (1 + \mu)^{-0,5}. \quad (2.18)$$

В табл. 2.8 приведены экспериментальные значения числа Рейнольдса Re , и результаты обработки данных по формуле (2.18) Re_k для частиц диаметром 2,5; 5; 10 мм и плотностью 400 и 800 $кг/м^3$.

Уравнение (2.18) обобщает влияние различных факторов на скорость витания группы твердых частиц и может быть использовано для расчета широкого круга задач в области аспирации и пневмотранспорта.

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.

Таблица 2.8

Значения числа Рейнольдса Re_3 и результаты обработки данных по формуле (2.18) Re_k

Номер опыта	Плотность частицы, $\rho_{\text{ч}}$, кг/м ³	Диаметр частиц, d , мм	Зависимости критерия Re от массовой концентрации
1	400	2,5	<p>График зависимости критерия Рейнольдса Re от массовой концентрации μ (кг/кг) для опыта 1. Показаны значения Re_3 (синие точки) и Re_k (красные точки) с степенной аппроксимацией (черная линия). Ось Re имеет диапазон от 0 до 2000, ось μ — от 0 до 0,6.</p>
2	400	5	<p>График зависимости критерия Рейнольдса Re от массовой концентрации μ (кг/кг) для опыта 2. Показаны значения Re_3 (синие точки) и Re_k (красные точки) с степенной аппроксимацией (черная линия). Ось Re имеет диапазон от 0 до 6000, ось μ — от 0 до 0,4.</p>

Номер опыта	Плотность частицы, $\rho_{\text{ч}}$, кг/м ³	Диаметр частиц, d , мм	Зависимости критерия Re от массовой концентрации
3	400	10	<p>Graph 3: Dependence of Re on mass concentration μ (kg/kg). The y-axis (Re) ranges from 0 to 10000. The x-axis (μ) ranges from 0 to 1.4. Data points for $Re_{\text{э}}$ (blue) and $Re_{\text{к}}$ (red) are plotted, along with a power-law fit line (black). The Re values decrease from approximately 8500 at $\mu=0.25$ to 4500 at $\mu=1.3$.</p>
4	800	2,5	<p>Graph 4: Dependence of Re on mass concentration μ (kg/kg). The y-axis (Re) ranges from 500 to 1500. The x-axis (μ) ranges from 0.1 to 0.6. Data points for $Re_{\text{э}}$ (blue) and $Re_{\text{к}}$ (red) are plotted, along with a power-law fit line (black). The Re values decrease from approximately 1250 at $\mu=0.2$ to 1100 at $\mu=0.55$.</p>
5	800	5	<p>Graph 5: Dependence of Re on mass concentration μ (kg/kg). The y-axis (Re) ranges from 2000 to 4000. The x-axis (μ) ranges from 0.2 to 0.9. Data points for $Re_{\text{э}}$ (blue) and $Re_{\text{к}}$ (red) are plotted, along with a power-law fit line (black). The Re values decrease from approximately 3300 at $\mu=0.3$ to 2900 at $\mu=0.8$.</p>

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]:

$$\frac{w}{w_{\text{ч}}} = \frac{1}{1 + 1,3 \cdot \mu'^{1/3}}. \quad (2.19)$$

Некоторые исследователи связывают скорость осаждения в двухфазной системе не с объемной долей частиц, а с величиной порозности, т. е. долей объема, не занятого твердыми частицами. Это, скорее всего, характерно для процессов осаждения частиц в пылеуловителях. Используя закон фильтрации Дарси находят выражение для силы сопротивления, испытываемой частицей в облаке монодисперсных частиц:

$$F_{\text{с}} = 3\pi\mu d w_{\text{ч}}\lambda, \quad (2.20)$$

где λ – коэффициент, отражающий взаимные влияния частиц, зависит [47] от объемной концентрации частиц;

$$\lambda = \frac{4 + 3\mu' + 3(8\mu' - 3\mu'^2)^{1/2}}{(2 - 3\mu')^2}, \quad (2.21)$$

где μ' – объемная концентрация, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

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 [136]. 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 (2.19) для оценки взаимного влияния частиц (коэффициента λ), 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:

$$\frac{w_{\text{вит.гр}}}{w_{\text{вит.ч}}} = \frac{0,75 \cdot \lambda^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_{\text{ч}}}\right)^{0,2}}{(1 + \mu)^{0,25}}. \quad (2.22)$$

Результаты экспериментальных исследований и обработки по формуле (2.22), позволяющие оценить влияние стесненности, представлены на рис. 2.13.

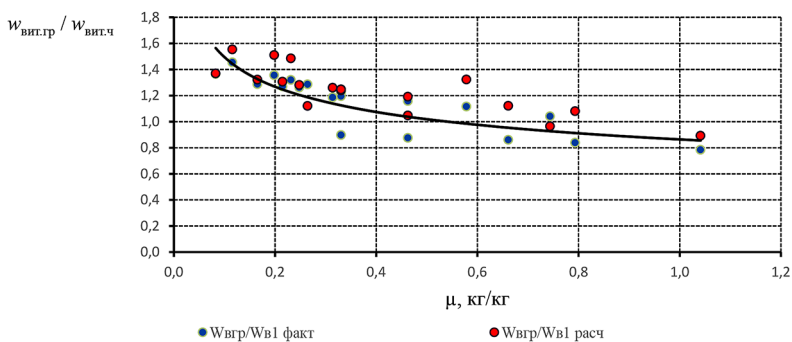


Рис. 2.13. Влияние стесненности пылевоздушного потока на скорость витания группы частиц

Результаты исследований скорости витания твердых частиц в турбулентном восходящем потоке показывают, что с увеличением количества частиц в группе скорость витания этой группы снижается.

ется 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 (см. рис. 2.4), в схему которой внесены следующие изменения (рис. 2.14):

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

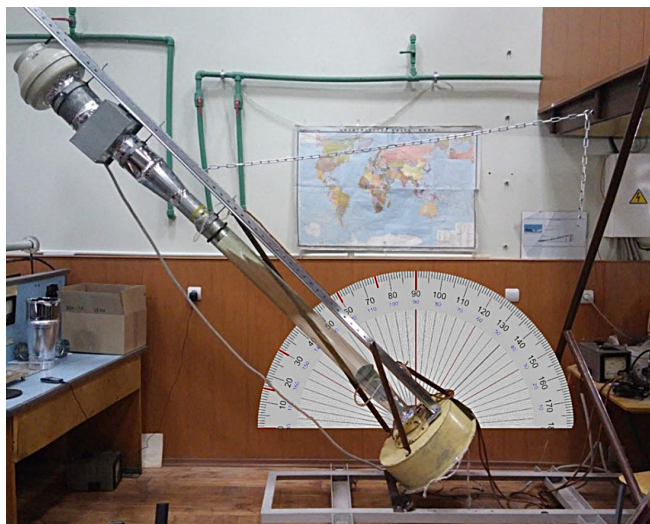


Рис. 2.14. Экспериментальная установка

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.

Далее приведена последовательность проведения измерений скорости транспортирования твердых частиц.

1. Устанавливался угол наклона опытной установки (рис. 2.15) – 0° ; 15° ; 30° ; 45° ; 60° ; 75° ; 90° .

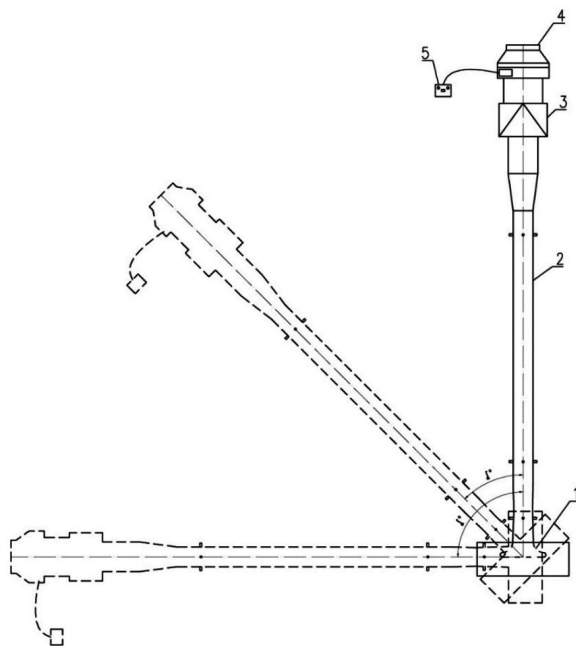


Рис. 2.15. Схема экспериментальной установки для определения скорости транспортирования: 1 – коллектор входной; 2 – прозрачный воздуховод постоянного сечения; 3 – фильтр; 4 – вентилятор; 5 – лабораторный автотрансформатор

2. Включался вентилятор, создающий разрежение на входе в коллектор.

3. В лоток помещалось определенное количество исследуемых частиц.

4. Визуально определялось начало движения частиц.

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 разд. 2.2.

Обработка результатов представлена в табл. 2.9 и 2.10. В табл. 2.9 и на рис. 2.16 представлены результаты обработки скорости транспортирования в наклонном воздуховоде по отношению к скорости витания. Принята скорость витания 9,9 м/с из табл. 2.1.

Таблица 2.9

Скорости транспортирования

№ п/п	Угол наклона трубы, град.	Скорость транспортирования, w_t , м/с	Среднее значение, w_{cp} , 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		

Окончание табл. 2.9

№ п/п	Угол наклона трубы, град.	Скорость транспортирования, w_T , м/с	Среднее значение, $w_{ср}$, м/с	$\frac{w_T}{w_{вит}}$
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		

Таблица 2.10

Результаты экспериментальных исследований потерь давления в воздуховодах

№ п/п	Угол наклона трубы, град.	Потери давления в воздуховоде, ΔP , Па	Среднее значение, $P_{ср}$, Па	$\frac{\Delta P_a}{\Delta P_{гор}}$
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		

Окончание табл. 2.10

№ п/п	Угол наклона трубы, град.	Потери давления в воздуховоде, ΔP , Па	Среднее значение, $P_{\text{ср}}$, Па	$\frac{\Delta P_{\alpha}}{\Delta P_{\text{гор}}}$
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		

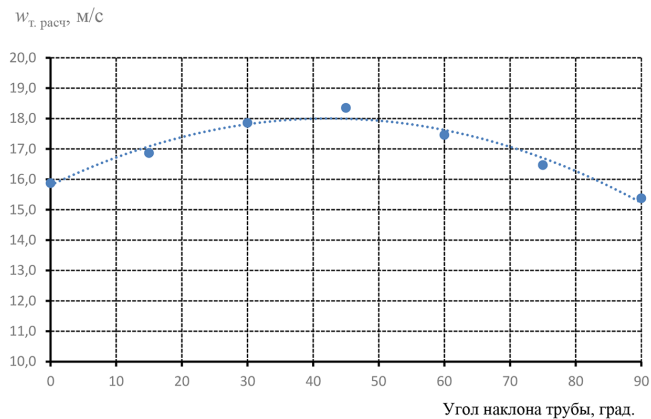


Рис. 2.16. Скорость транспортирования в зависимости от угла наклона трубопровода

Экспериментальные данные изменения скорости транспортирования по отношению к скорости витания в зависимости от угла наклона трубопровода α представлены на рис. 2.17. Подобный характер распределения скорости транспортирования в зависимости от угла наклона описан в работах [42], [44], [61].

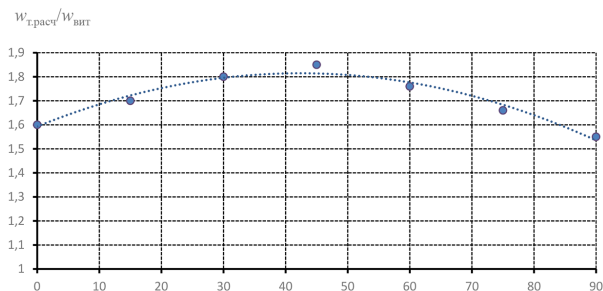


Рис. 2.17. Отношение скорости транспортирования к скорости витания в зависимости от угла наклона трубопровода

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

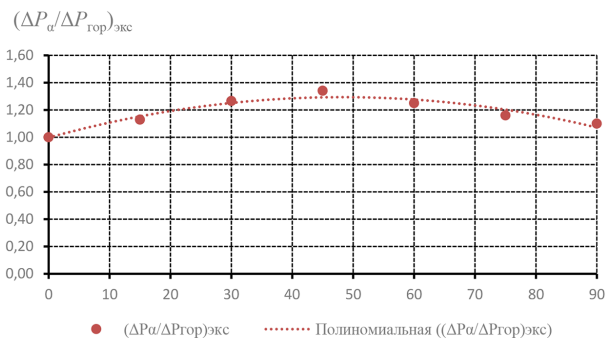


Рис. 2.18. Отношение потери давления в наклонном к потерям давления горизонтальном воздуховоде в зависимости от угла наклона

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

Таблица 2.11

Сводная таблица результатов исследования

Угол наклона трубы, α , град.	$\frac{w_T}{w_{\text{вит}}}$	$\frac{\Delta P_\alpha}{\Delta P_{\text{сop}}}$
0	1,6	1,00
15	1,7	1,13
30	1,8	1,27
45	1,85	1,34
60	1,76	1,25
75	1,66	1,16
90	1,55	1,10

Если определить критерий Рейнольдса по экспериментальному значению скорости витания частицы $Re_{\text{вит}} = \frac{w_{\text{вит}} d}{\nu}$, то зависимость для критерия Фруда, найденного по скорости транспортирования $Fr_T = \frac{w_T^2}{gd_{\text{ч}}}$, может быть описана следующей зависимостью:

$$Fr_k = Re_{\text{вит}}^{0,89} (1 + \sin 2\alpha)^{0,5}. \quad (2.23)$$

На рис. 2.19 приведены результаты экспериментальных исследований критерия Фруда $Fr_{\text{э}}$ и расчетные значения Fr_k 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.

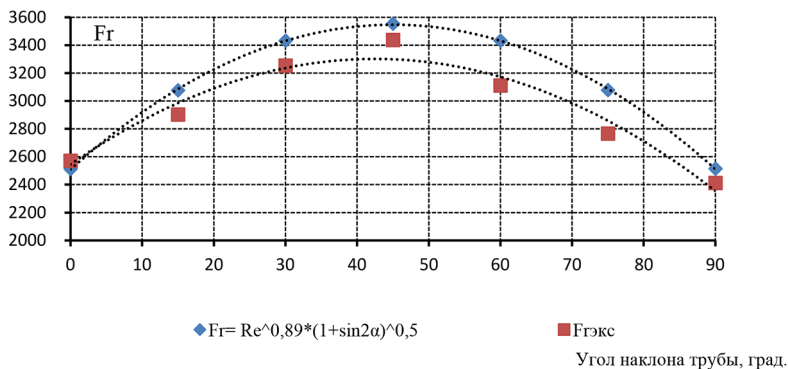


Рис. 2.19. Соотношение экспериментальных и расчетных значений критерия Фруда в зависимости от угла наклона трубопровода

2.6. 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 α от 0 до 90° и зависи-

мости скорости транспортирования в наклонном и горизонтальном воздуховодах.

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

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], [61], [79], [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 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:

$$dw'_r + \mu d'w'_c = 0; \quad (3.1)$$

$$m_c \frac{dw_c}{dt} = C \frac{\rho_r (w'_r - w'_c) |w'_r - w'_c|}{2} S_m, \quad (3.2)$$

где w'_r и w'_c – пульсационные составляющие скорости газа и частиц; m_s – масса частицы; $m = \frac{\pi d_c^3 \rho_c}{6}$; S_m – 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 τ_{ij} определены с помощью релогического 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 δ_{ij} – символ Кронекера, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$; S_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций, определяемые выражением $s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; $\overline{u'_i u'_j}$ – компоненты тензора турбулентных напряжений.

Для замыкания системы уравнений необходимо определить шесть различных компонент симметричного тензора турбулентных напряжений τ_{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 – ε модель турбулентности Лаундера–Шарма [131]:

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

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

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; C_\mu = 0,09; C_{\varepsilon 1} = 1,44; C_{\varepsilon 2} = 1,92; \sigma_k = 1; \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

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; ε – скорость диссипации – кинетической энергии турбулентности; μ_t – турбулентная вязкость; $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ – полуэмпирические коэффициенты модели турбулентности.

Приведенная формулировка k – ε 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], [28]–[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 – ε модель турбулентности. Дискретизация исходных уравнений осуществлялась методом контрольного объема. Поля скорости и давления рассчитывались с помощью процедуры PISO [126] в сочетании с многосеточным алгоритмом AMG [134].

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 1 до 200, также меняется их взаимное расположение (модели представлены на рис. 3.4 и в табл. 3.1). В численном эксперименте масса частиц не учитывалась.

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

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 (рис. 3.1).

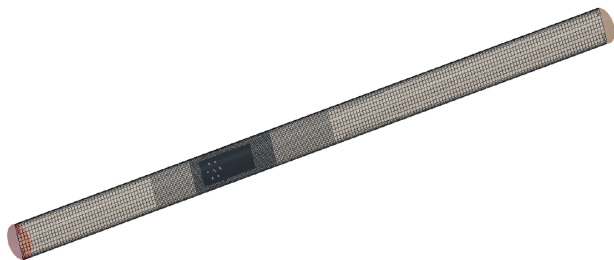


Рис. 3.1. Расчетная сетка в объеме трубы

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

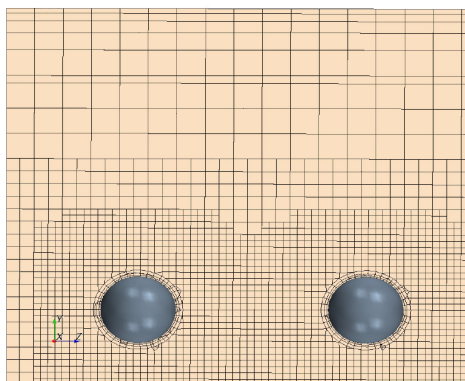


Рис. 3.2. Фрагменты расчетной сетки

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 (см. рис. 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 рис. 3.3 представлен график сил, действующих на частицы, полученный в результате расчета для 42 частиц.

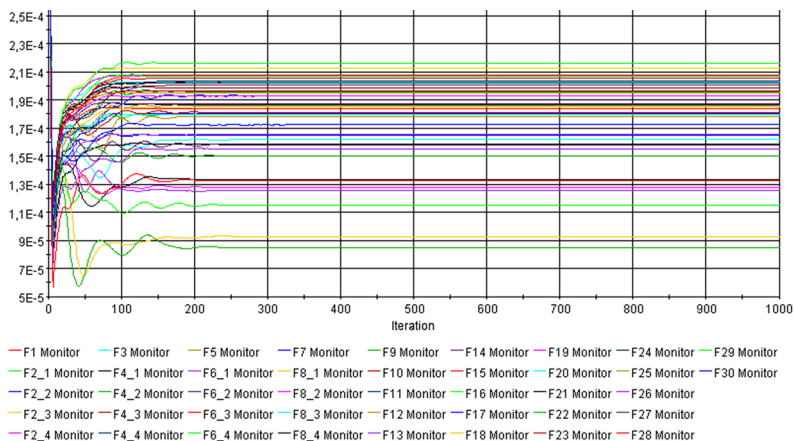


Рис. 3.3. График изменения сил, действующих на частицы в процессе расчета

В результате расчетов получены поля скоростей и давления, формирующиеся в воздуховоде (рис. 3.4).

На рис. 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.

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.

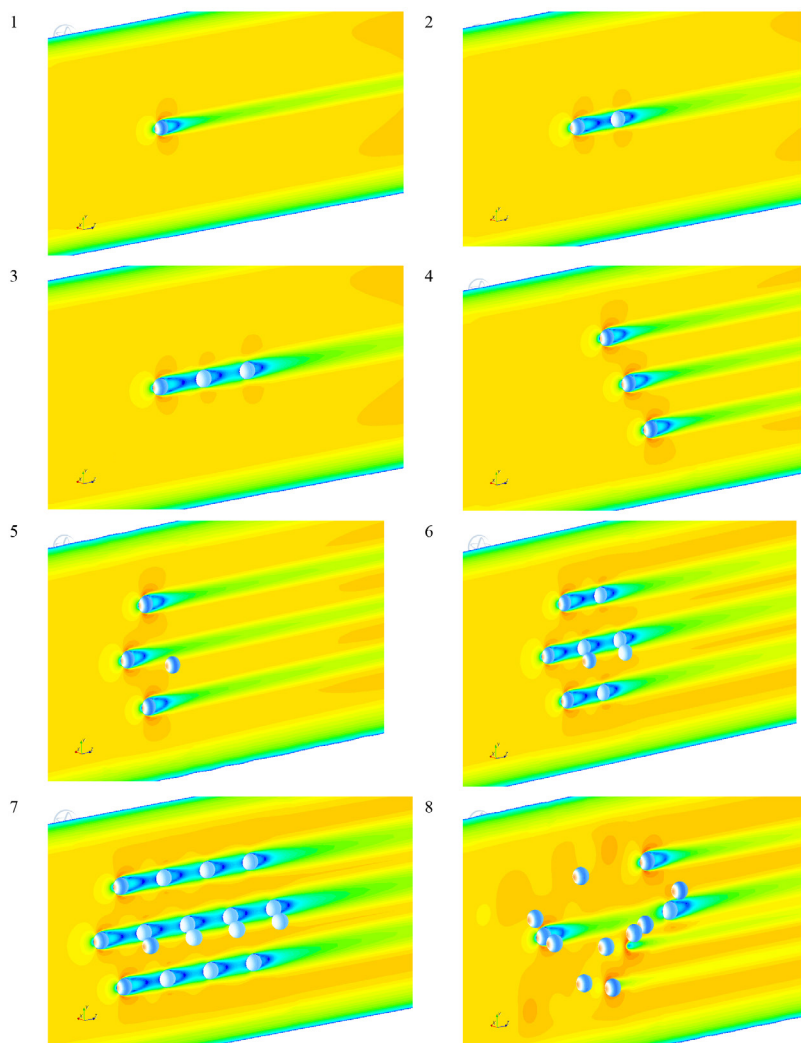


Рис. 3.4. Поля скоростей воздуха и давления на частицы

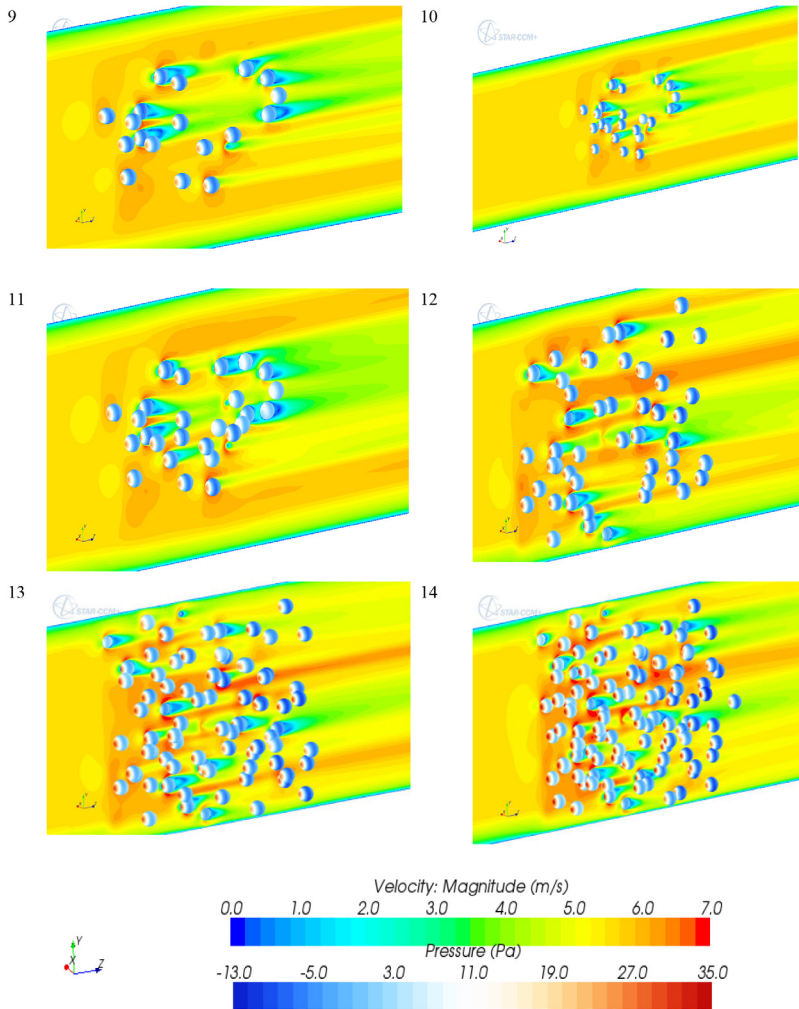


Рис. 3.4. Окончание

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, мы получили диапазон изменения относительной силы давления на частицу (см. табл. 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 рис. 3.5.

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

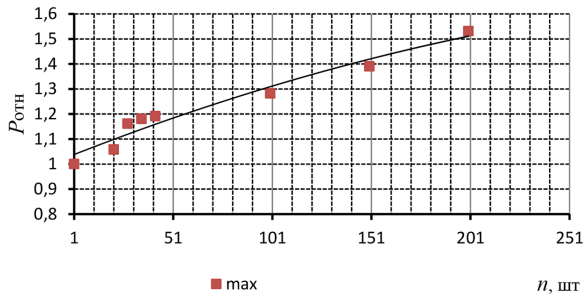


Рис. 3.5. Изменение максимальной относительной силы давления на частицу в зависимости от количества хаотично расположенных частиц

3.2. Численное моделирование скорости витания

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

В работах по аэродинамике струйных течений с примесью, в частности, [1] отмечено, что 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]:

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

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 ($g_i = g \cdot \cos \alpha$); α – угол наклона потока к поверхности земли.

Влияние веса частиц на значение пульсационной скорости газа будет значительно тогда, когда составляющая скорости витания частиц соизмерима с соответствующей составляющей пульсационной скорости газа. Проекция скорости витания на ось потока и на перпендикулярное направление определяются из условия

$$c \frac{\rho_{\text{г}} W_{\text{вигi}}^2 \pi d_{\text{ч}}^2}{2} = \frac{4 \pi d_{\text{ч}}^3}{3} \rho_{\text{г}} g_i. \quad (3.11)$$

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 - ϵ , 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), уравнения (3.3)–(3.9), с применением дискретного метода, основанного на подходе Лагранжа, уравнения (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 – крутящий момент отдельной частицы, возникающий в результате действия силы взаимодействия, приложенной на частицу в точке, отличной от центра тяжести частицы; r_c – является вектором от центра тяжести частицы к точке контакта; μ_r – коэффициент трения качения; ω_p – угловая скорость вращения частицы.

Коэффициент трения качения μ_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; ρ – плотность воздуха; v_s – скорость скольжения частицы; 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; ∇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], [129].

В рамках данной модели силы, действующие между двумя сферами A и B , 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; $K_t = 8G_{eq} \sqrt{d_n R_{eq}}$ – тангенциальная жесткость пружины; $N_t = \sqrt{5K_t M_{eq}} N_{tdamp}$ – тангенциальное демпфирование; N_{tdamp} – тангенциальный коэффициент затухания, определяемый из уравнения (3.23):

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

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

где C_{nrest} и C_{trest} – нормальный и касательный коэффициенты упругости; R_{eq} , M_{eq} , E_{eq} , G_{eq} – эквивалентные радиус и 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 (рис. 3.6, а);

- генерация расчетной сетки (рис. 3.6, б);
 - задание граничных условий.
2. Решение задачи.
 3. Просмотр результатов.

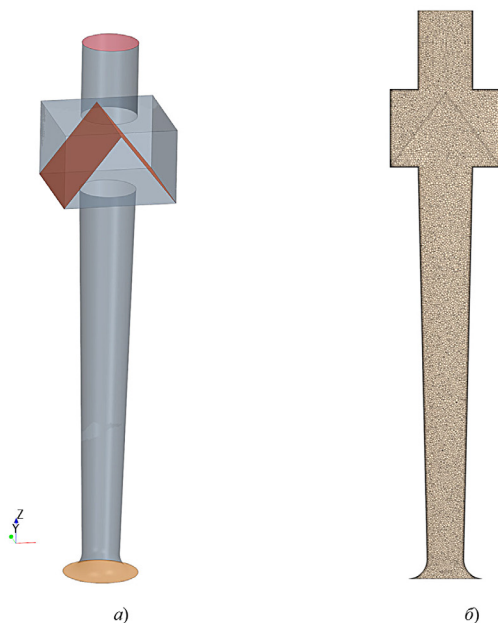


Рис. 3.6. Подготовка модели экспериментальной установки к численному моделированию процессов в экспериментальной установке: *а* – трехмерная модель установки; *б* – генерация расчетной сетки

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

Генерация расчетной сетки представляет собой разбиение исходной расчетной области на большое количество элементов – расчетную сетку. Для повышения точности расчета использовалась сетка с многогранными ячейками (см. рис. 3.6, б). Количество яче-

ек 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 (рис. 3.7).

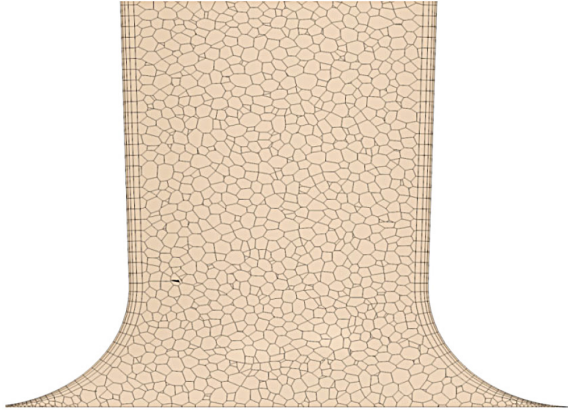


Рис. 3.7. Фрагмент расчетной сетки лемнискаты

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 - ε модель турбулентности;
- средняя интенсивность турбулентности на входе в расчетную область 1 %;
- условия взаимодействия частиц со стенками расчетной области и непосредственно между ними.

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 рис. 3.8), примерно через 60 с программного времени.



Рис. 3.8. Область максимального и минимального положения частиц

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

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 (см. рис. 3.8).

Рассмотрим конкретный случай, при котором диаметр частиц составляет 0,005 м, плотность – 800 кг/м³. Скорость воздуха принята по данным экспериментальных исследований на опытной уста-

3.2. Численное моделирование скорости витания

новке 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 шт.

На рис. 3.9, а в качестве примера для 140 частиц диаметром 0,005 м и плотностью 800 кг/м³ 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 рис. 3.9, б.

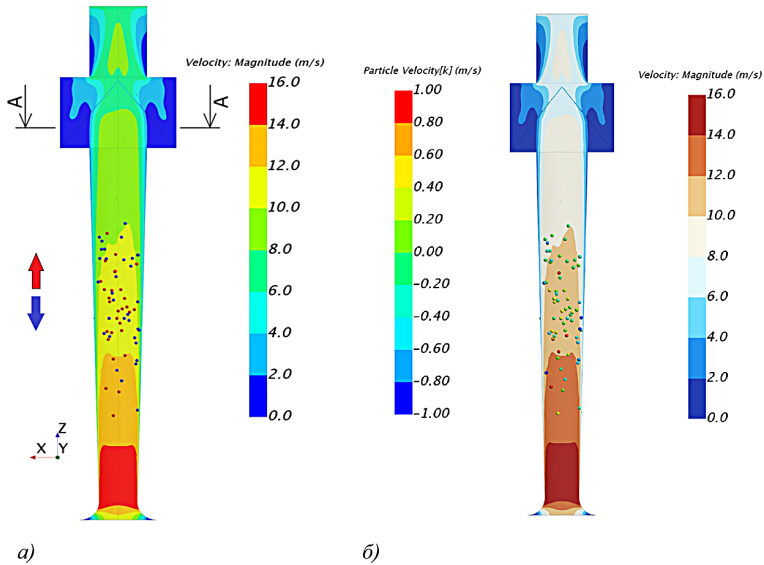


Рис. 3.9. Распределение частиц в области витания – а;
поля скоростей частиц и воздуха – б

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 %.

Далее в табл. 3.2 приведены средневзвешенные значения скоростей витания, полученные с использованием встроенной программы статистической обработки результатов.

На рис. 3.10 показано поперечное сечение $A-A$, в котором видно распределение частиц внутри воздуховода.

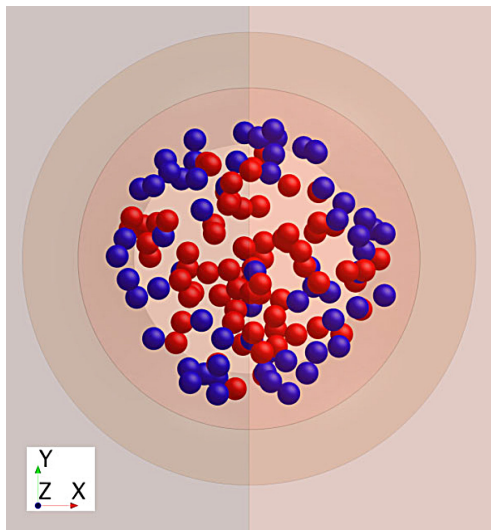


Рис. 3.10. Распределение частиц в поперечном сечении $A-A$

Как видно из профилей на рис. 3.9 и распределения на рис. 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 кг/м³, а также диаметром 0,005 м и плотностью 400 и 800 кг/м³.

На рис. 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 кг/м³.

Наглядность результатов численного эксперимента демонстрирует соответствие аэродинамических процессов описанным в литературе [63], [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.

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 табл. 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 ³	Скорость витания, м/с, полученная		Номера рисунков
		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.

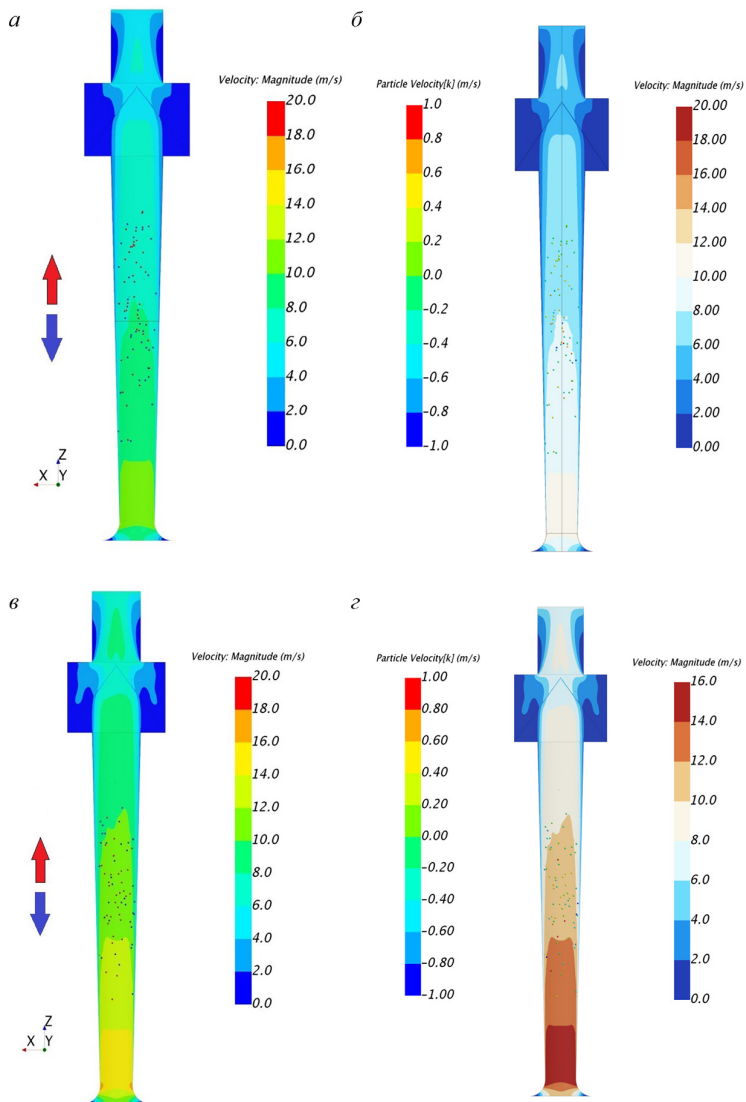


Рис. 3.11. Поля скоростей воздуха – *a*, *в*, *д*, *ж*;
поля скоростей частиц – *б*, *г*, *з*, *з*

3.2. Численное моделирование скорости витания

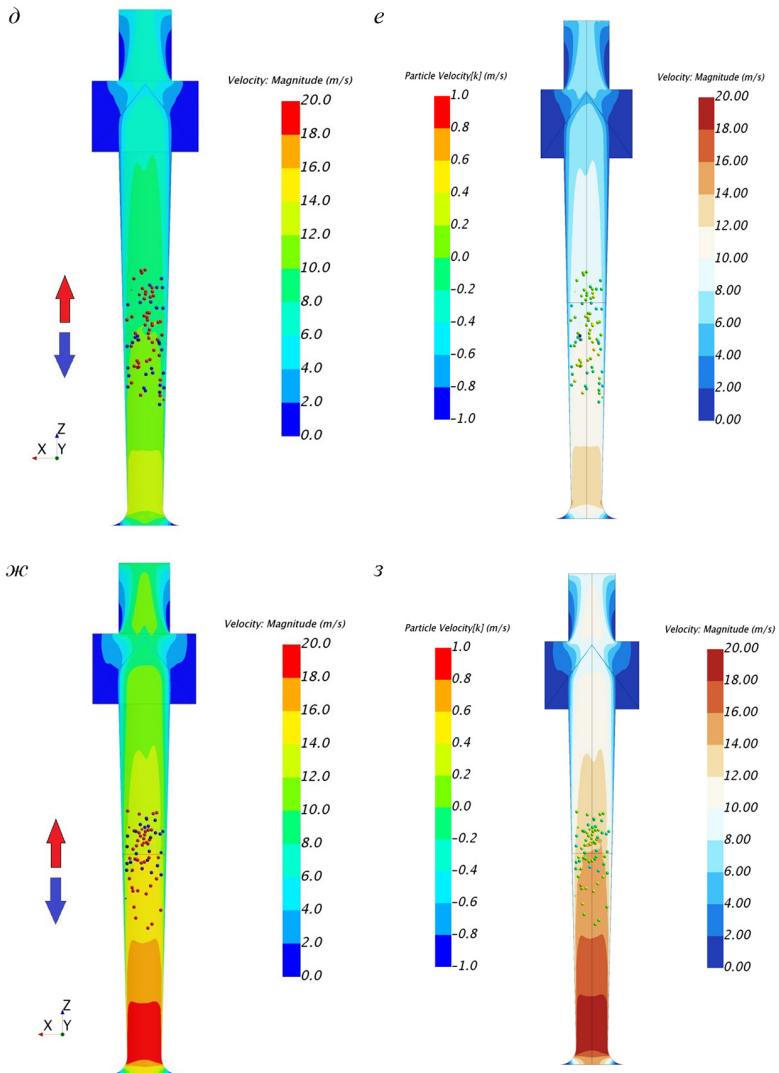


Рис. 3.11. Окончание

3.3. Моделирование теплообмена в воздуховодах аспирационных систем

Предприятия по производству строительных материалов, как правило, располагаются в промышленных зонах, которые в большинстве случаев характеризуются дефицитом тепловой энергии. В результате в производственных помещениях в холодный период года имеет место низкая температура воздуха. В цех нерудных материалов поступает из карьера мерзлая порода. Технологический процесс в данном цехе связан с дроблением породы в нескольких установках, которые объединены общей конвейерной линией. Для удаления пыли, неизбежно образующейся при дроблении материалов, предусмотрена аспирационная система с сухими циклонами, установленными вне цеха. Поскольку исходный материал на входе в технологическую линию имеет температуру, близкую к температуре наружного воздуха, то за период производственного цикла в холодный период года материал и пыль данного материала не достигают даже минимальной величины температуры внутреннего воздуха. Результаты анализа [113] показывают, что температура запыленного потока на входе в систему аспирации составляет не выше 2 °С, на входе в циклон температура потока существенно ниже 0 °С. Учитывая высокую влажность удаляемой пыли, это приводит к замораживанию пыли на стенках циклона и, соответственно, практической остановке процесса очистки.

Одновременно, на территории промышленного предприятия в непосредственной близости от цеха нерудных материалов располагается цех по производству известняковой муки, технологический процесс которого связан с обжигом исходного сырья, в результате которого в атмосферу удаляются высокотемпературные (порядка 120 °С) потоки отходящих газов. В работе [113] предложено использовать теплоту этого потока путем смешивания с холодным запыленным из цеха известняковой муки для обеспечения надежного обеспыливания вентиляционных выбросов и снижения загрязнения атмосферы. В связи с началом восстановления произ-

водства строительных материалов на предприятии строительной индустрии возникла необходимость разработки технической документации рассматриваемого инженерного решения на основе современных методов моделирования [123], [126], [130], [133], [137].

Исследованию процессов удаления пыли из производственных помещений и технологических установок посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ, в частности работы [4], [5], [48], [50], [80], [81], [84]. Однако при проведении экспериментальных исследований в лабораторных и натуральных условиях существенное влияние оказывают многочисленные случайные факторы. В основу численного моделирования турбулентных потоков при наличии источников теплоты и примеси положено численное решение системы дифференциальных уравнений неразрывности, сохранения импульса Навье–Стокса, энергии и примесей:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i + \bar{\rho}' u_i') &= S_m; \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) &= - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + S_i; \quad (3.24) \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a} u_i)}{\partial x_j} &= - \frac{\partial (\rho u'_j a')}{\partial x_j} + \bar{J}_a, \end{aligned}$$

где t – время; ρ – плотность; μ – коэффициент динамической вязкости; \bar{u}_j – компоненты вектора осредненной скорости по осям координат; τ'_{ij} – турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса); $u'_i, u'_j, T', \tilde{N}'$ локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока; \bar{a} осредненные значения удельной плотности скалярной величины; S_m, S_i – интенсивность источников массы и импульса; \bar{J}_a интенсивность источников примеси.

В работе [27] приведено подробное описание построения геометрической модели исследуемого процесса на основе принципов трехмерного проектирования в системе КОМПАС-3D [10], [11], [52]. Построено несколько вариантов геометрической модели, один вариант модели приведен на рис. 3.12. Геометрические модели использованы

для численного моделирования процесса смешивания в программе STAR-CCM+.



Рис. 3.12. Геометрическая модель узла смешивания потоков

Для определения параметров исследуемых потоков выполнен расчет потерь теплоты через стенку корпуса циклона на основании следующих исходных данных, полученных на основании натуральных исследований [27], [113]:

- температура наружного воздуха $t_n = -31$ °С;
- температура запыленного воздуха $t_3 = +2$ °С;
- относительная влажность запыленного воздуха $\varphi_3 = 95$ %;
- материал стенки циклона – Сталь 3 с толщиной стенки

$\delta = 3$ мм;

- температура выхлопных газов $t_r = +120$ °С;
- относительная влажность горячего газа $\varphi_r = 6$ %;
- производительность аспирационной системы по воздуху

$L_3 = 3000$ м³/ч;

- расход выхлопных газов $L_r = 600$ м³/ч;
- диаметр циклона серии ЦН ОАО «НИИОГАЗ» $D = 0,63$ м.

На основании данных работы [6] определена температура точки росы в циклоне, которая составила при использовании системы без подмешивания $t_{т.р} = +1,5$ °С, при подмешивании $t_{т.р} = -12$ °С.

Для нахождения температуры внутренней поверхности стенки циклона выполнен расчет соответственно коэффициентов теплоотдачи при свободном внешнем обтекании вертикальной трубы и вынужденном внутреннем движении воздушного потока с учетом данных [6] по известным критериальным зависимостям:

$$\text{Nu}_{\text{св}} = 0,8 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \cdot \varepsilon; \quad (3.25)$$

$$\text{Nu}_{\text{вын}} = 0,322 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_c}\right)^{0,25}, \quad (3.26)$$

где ε – поправка, учитывающая зависимость числа Прандтля от температуры; Nu – критерий Нуссельта; Pr – критерий Прандтля, определяется по данным работы [6] по температуре потока и стенки (индекс «с»); Gr , Re – критерии Грасгофа и Рейнольдса, определяемые по зависимостям:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3}{\nu^2} \Delta t; \quad (3.27)$$

$$\text{Re} = \frac{wd}{\nu}; \quad (3.28)$$

$$\varepsilon = \left[1 + \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\text{Pr}}} \right)^2 \right]^{-1/4}, \quad (3.29)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; β – коэффициент объемного расширения, К^{-1} ; d – диаметр, м (для горячего потока – 125 мм, для холодного запыленного – 250 мм); ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; w – скорость движения потока, м/с .

Коэффициенты теплоотдачи определены по формуле

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{d}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (3.30)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Для наружной поверхности циклона коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{н}} = 33,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, для внутренней поверхности $\alpha_{\text{в}} = 5,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Исходя из полученных данных, определен с учетом характеристики материала стенки [6] коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b}}. \quad (3.31)$$

Для определения плотности теплового потока через поверхность стенки и температуры на стенке использованы выражения:

$$q = k(t_b - t_n) = \alpha_b(t_b - t_{b,c}) = \alpha_n(t_{n,c} - t_n), \quad (3.32)$$

где t_b – температура потока внутри циклона, °С.

Отсюда температура на внутренней поверхности

$$t_{b,c} = t_b - \frac{k}{\alpha_b}(t_b - t_n). \quad (3.33)$$

Для аспирационной системы без подмешивания выхлопных газов температура внутренней поверхности стенки составляет –17,7 °С, при этом температура точки росы $t_{т.р} = 1,5$ °С. При подмешивании выхлопных газов к холодному запыленному температура внутренней поверхности стенки составляет 2 °С, при этом температура точки росы $t_{т.р} = -12$ °С, т. е. выполняется условие $t_{b,c} > t_{т.р}$. При этом обеспечивается с одной стороны надежная работа циклона по очистке от пыли вентиляционных выбросов цеха нерудных материалов, с другой уменьшается объем тепловых выбросов из цеха по производству известняковой муки.

Для нахождения рациональной формы узла смешивания холодного и теплого потоков используется численное моделирование процессов тепло- и массообмена и аэродинамики с применением программы Star-ССМ+. Помимо указанных исходных параметров приняты также характеристики пыли: динамическая вязкость, молекулярная масса и удельная теплоемкость. На основании приведенных расчетов процесса теплопередачи через стенку циклона определена требуемая конечная температура 22 °С пылегазовоздушного потока для обеспечения эффективной работы циклона. Длина

участка смешивания принята неизменной. В расчете принята k - ϵ модель турбулентности.

На рис. 3.13 приведены результаты численного моделирования процессов смешивания при различных вариантах угла наклона подачи горячего потока в холодный пылевоздушный.

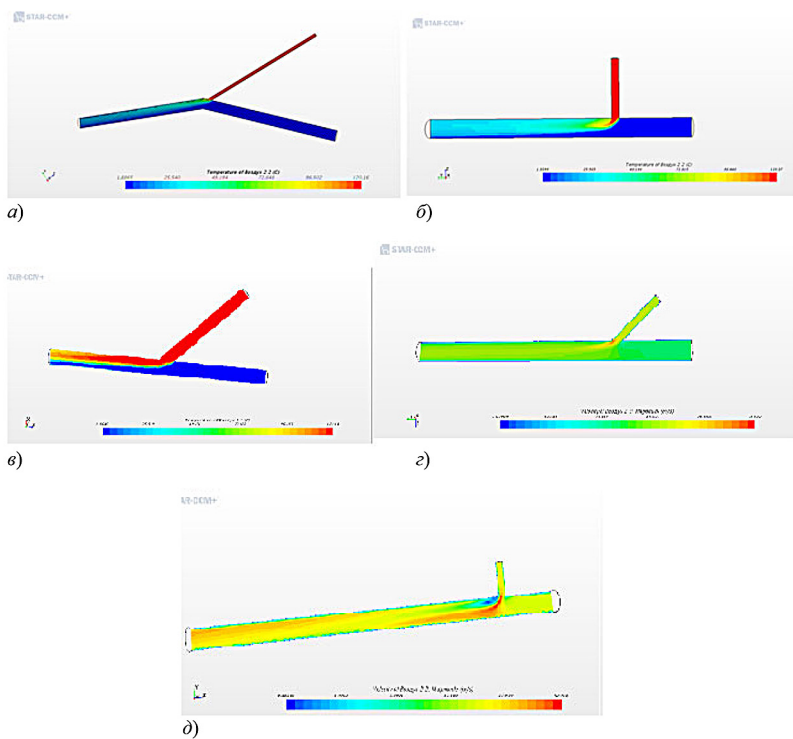


Рис. 3.13. Результаты численного эксперимента

На схемах a – d прямой участок узла смешивания не изменялся. На схемах a – e приведено распределение температуры потоков. Схема 3.13, a отличается наименее низкой температурой по сечению

воздуховода, значительной зоной с температурой, близкой к 0°C . Результаты численного расчета (схема 3.13, б) показывают, что при подмешивании горячего потока под углом 90° удалось обеспечить лучшее перемешивание. Но в этом случае также по всей длине участка смешивания имеет место зона с температурой, близкой к 0°C . При использовании схемы 3.13, в (угол наклона горячего потока 45°) потоки интенсивно смешиваются, но для обеспечения равномерного распределения температуры необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия. На схеме 3.13, г приведена схема с углом наклона горячего потока 45° , которая характеризуется достаточно равномерным распределением скорости потоков. Распределение скорости потока на схеме 3.13, д также равномерное, но особенности температурного поля (схема 3.13, б) не позволяют принять данную схему, как рациональную. В качестве рациональной схемы выбрана схема с углом наклона горячего потока 45° , причем в конце участка смешивания предусмотрено сужение основного воздуховода. За счет этого в конце участка смешивания происходит вторичное перемешивание потоков, что подтверждается распределением скорости (рис. 3.14, а) и температуры в отдельных сечениях участка смешивания (рис. 3.14, б).

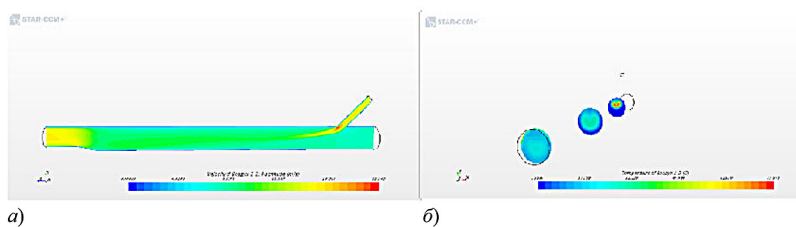


Рис. 3.14. Результаты численного моделирования для рациональной схемы узла смешивания потоков

В табл. 3.3 приведен анализ средних значений скорости и температуры для сечения в конце участка смешивания по результатам теоретического расчета и численного моделирования.

Таблица 3.3

Анализ результатов исследований

Результаты теоретического расчета		Результаты численного моделирования	
Скорость, м/с	Температура, °С	Скорость, м/с	Температура, °С
16	22	18	24

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что имеет место удовлетворительное (в пределах 10 %) соответствие сравниваемых параметров.

3.4. Выводы

1. Разработана численная модель взаимодействия потока воздуха с неподвижными твердыми частицами в воздуховоде с использованием k - ε 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.

5. Использование утилизации теплоты газозвдушного потока от печей цеха производства известняковой муки позволит обеспечить необходимую температуру пылевоздушного потока для

повышения надежности работы циклона в аспирационной системе цеха нерудных материалов, а также обеспечить снижение объемов тепловых выбросов в атмосферу.

б. На основе метода численного моделирования с применением программного комплекса STAR-CCM+ обоснована наиболее рациональная схема узла смешивания потоков, соотношение расходов холодного и горячего потоков.

Глава 4

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

4.1. Устройство и типы систем всасывающего пневмотранспорта

Системы пневмотранспорта предназначены для транспортировки твердых частиц (сыпучих материалов) от мест их улавливания до мест складирования или последующей технологической операции.

Принципиальная схема стационарной системы вакуумной очистки представлена на рис. 4.1.

На схеме показаны несколько вариантов применения вакуумного пневмотранспорта [8]:

- очистка пола, подкрановых путей, строительных конструкций (запыленный воздух поступает в фильтр-сепаратор вакуумной установки);
- возвращение просыпей материала в технологический процесс (материал через стационарный фильтр-сепаратор подается на транспортер);
- зачистка технологического оборудования при его остановке (материал собирается в предварительном сепараторе и при запуске оборудования возвращается в производство).

Вакуумный пневмотранспорт применяется также для транспортировки твердого сыпучего материала к месту складирования (рис. 4.2).

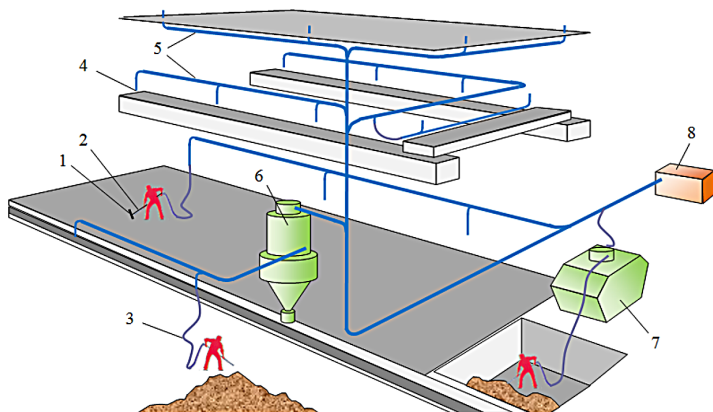


Рис. 4.1. Принципиальная схема стационарной системы вакуумной очистки:
1 – насадок; 2 – рукоятка; 3 – шланг; 4 – штуцер-клапан; 5 – трубопровод;
6 – стационарный фильтр-сепаратор; 7 – предварительный сепаратор;
8 – передвижная вакуумная установка

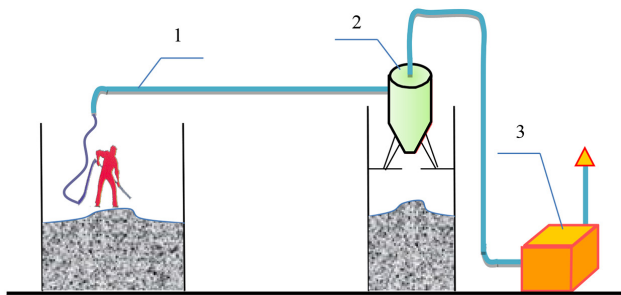


Рис. 4.2. Транспортировка материала к месту складирования:
1 – пневмопровод; 2 – циклон-разгрузитель; 3 – побудитель тяги

При работе всасывающего пневмотранспорта протекают следующие процессы: всасывание потоком воздуха в насадке сыпучего материала; транспортирование материала в аэрозольном состоянии по сети трубопроводов; очистка запыленного воздуха (разгрузка материала) в пылеуловителях; удаление очищенного воздуха в атмосферу или в рабочую зону.

В зависимости от поставленной задачи на предприятиях по производству строительных материалов применяют следующие системы вакуумной пылеуборки:

- передвижные промышленные пылесосы;
- стационарные системы трубопроводов и передвижные вакуумные установки;
- стационарные системы трубопроводов и стационарные вакуумные установки;
- автономные вакуумные системы, установленные на грузовике или прицепе.

Использование передвижных промышленных пылесосов для уборки производственных помещений предприятий строительной промышленности (рис. 4.3) ограничено из-за ряда причин:

- малая производительность промышленных пылесосов по воздуху часто недостаточна для высокопроизводительной и качественной уборки различных по характеру поверхностей;
- сравнительно небольшое разрежение не позволяет во многих случаях применять шланги необходимой длины;
- ограниченная емкость пылевых бункеров влечет за собой дополнительные трудности при сборе и удалении пыли из помещений со значительными пылеотложениями;
- несовершенство очистки воздуха, выбрасываемого пылесосами в убираемое помещение;
- неудобство уборки помещений, насыщенных технологическим оборудованием.



Рис. 4.3. Передвижной промышленный пылесос



Рис. 4.4. Передвижной промышленный пылесос с предварительным сепаратором [93]

Стационарные системы трубопроводов с передвижными вакуумными установками применяются в случаях периодических скоплений большого количества просыпей.

Такие системы вакуумной пылеуборки рационально использовать, например, в цехе обжига клинкера (рис. 4.5).

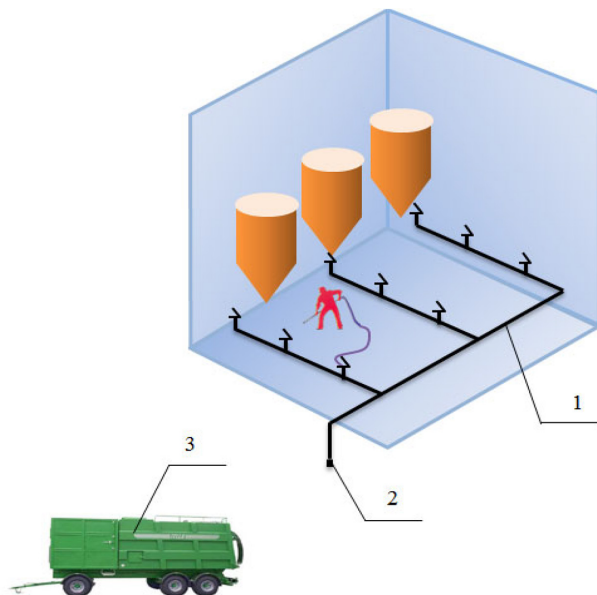


Рис. 4.5. Стационарная система трубопроводов с передвижной вакуумной установкой: 1 – стационарный трубопровод; 2 – место присоединения шланга установки; 3 – автономная вакуумная установка

В помещении, где расположены фильтры, обычно пылеуборка не требуется, но во время аварийной остановки из фильтра выгружается на пол от 10 до 15 м³ материала. Предлагаемая схема пылеуборки позволяет быстро и качественно ликвидировать последствия аварии, а в остальное время установку можно использовать на других участках.

Самое широкое распространение получили стационарные централизованные пылеуборочные установки (рис. 4.6).

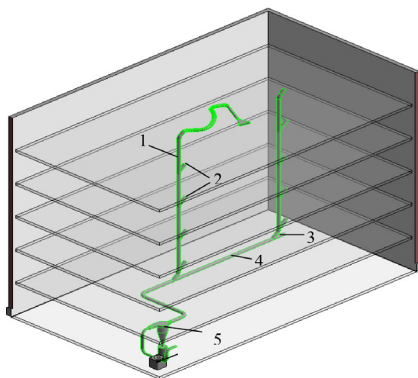


Рис. 4.6. Схема стационарной вакуумной пылеуборки:
1 – стояк пылеудаления; 2 – соединительный штуцер-клапан;
3 – съемная заглушка для прочистки пылепровода; 4 – магистральный пылепровод; 5 – очиститель воздуха; 6 – пылесосная установка

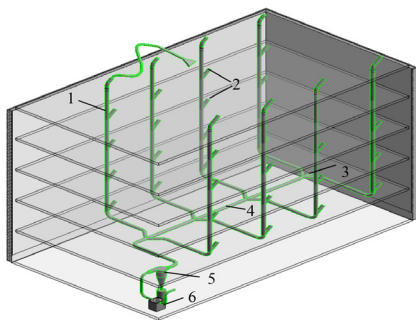


Рис. 4.7. Схема вакуумной централизованной пылеуборки с горизонтальным магистральным трубопроводом: 1 – стояк пылеудаления; 2 – соединительный штуцер-клапан; 3 – съемная заглушка для прочистки пылепровода; 4 – магистральный пылепровод; 5 – очиститель воздуха; 6 – пылесосная установка

В производственных условиях их можно применять при любой интенсивности выделений и осадений пыли на поверхностях, они отличаются большой производительностью по воздуху, очищаемой площади и убираемой пыли.

По способу прокладки магистрального трубопровода системы вакуумной централизованной пылеуборки проектируются с горизонтальным магистральным пылепроводом (рис. 4.7) или с вертикальным магистральным пылепроводом (рис. 4.8) [93].

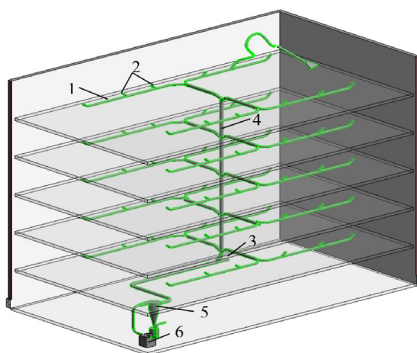


Рис. 4.8. Схема вакуумной централизованной пылеуборки с вертикальным магистральным пылепроводом

Система с горизонтальным магистральным пылепроводом предусматривается с применением настенных соединительных клапанов (рис. 4.9).

Система с вертикальным магистральным пылепроводом предусматривается с применением напольных соединительных клапанов (рис. 4.10). Допускается проектирование системы с комбинацией горизонтального и вертикального магистральных пылепроводов (рис. 4.11). Радиус обслуживания одним соединительным клапаном при вакуумной централизованной пылеуборке не более 15 м. По сравнению с передвижными пылеуборочными установками, стационарные системы вакуумной централизованной пылеуборки:
– дают более высокий гигиенический эффект;

- надежны в работе;
- удобны в эксплуатации;
- требуют меньшего штата обслуживающего персонала.

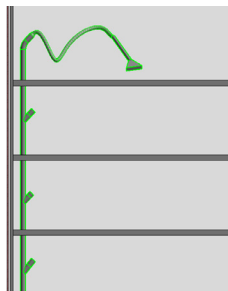


Рис. 4.9. Расположение соединительных клапанов в системе с горизонтальным магистральным пылепроводом

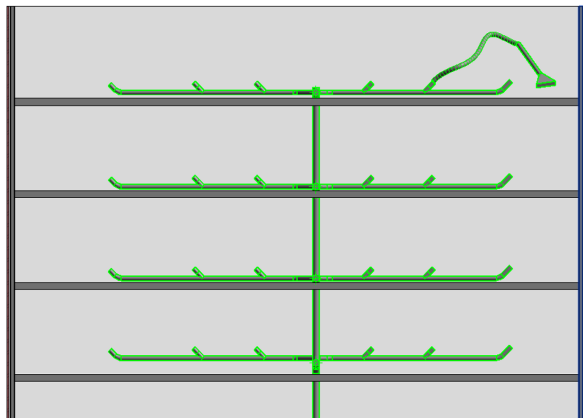


Рис. 4.10. Расположение соединительных клапанов в системе с вертикальным магистральным пылепроводом

Автономные вакуумные системы, установленные на грузовике (рис. 4.12) или прицепе (рис. 4.13):

- транспортируют материал, который по своей консистенции может проходить через шланги установки (диаметр шланга 150–200 мм), к таким материалам относятся камень, гравий, песок, шлам, жидкость;
- имеют большую производительность по воздуху (до 8000 м³/ч);
- создают высокую силу всасывания (вакуум до 90 %);
- выдувают материал из контейнера на большую высоту.

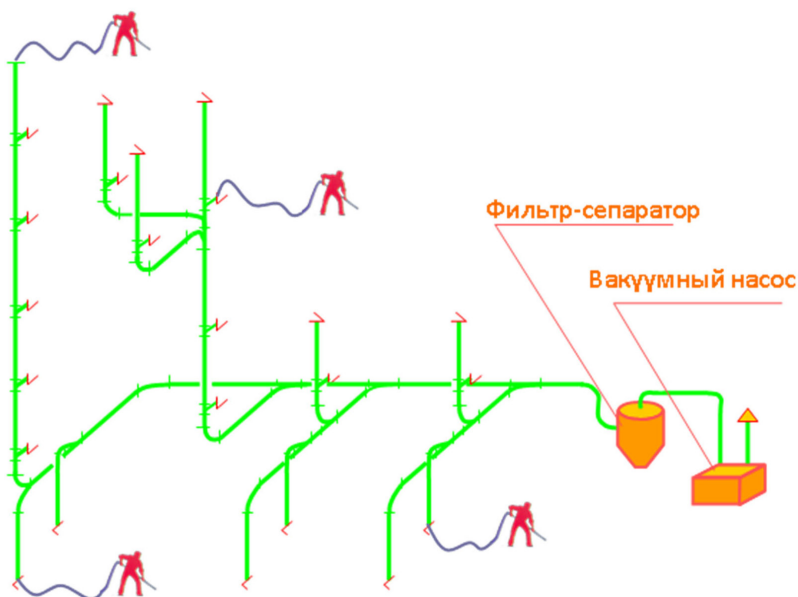


Рис. 4.11. Схема вакуумной централизованной пылеуборки с комбинацией горизонтального и вертикального магистральных пылепроводов



Рис. 4.12. Автономная вакуумная установка на грузовике [93]



Рис. 4.13. Автономная вакуумная установка на грузовике [93]

4.2. Пылеуборочный инструмент

Эффективность вакуумной пылеуборки в значительной мере определяется эффективностью работы пылеуборочного инструмента, так как самым энергоемким процессом является процесс удаления пыли с убираемой поверхности. В пылесосной насадке и шланге потери давления на трение и местные сопротивления

иногда достигают 50 % общей величины потерь в системах вакуумной пылеуборки [64].

Пылеуборочный инструмент состоит из набора пылесосных насадков, рукоятки, соединяющей насадки со шлангом, и легкого гибкого армированного шланга, присоединяемого к сети трубопроводов штуцерами-клапанами.

Пример компоновки пылеуборочного инструмента показан на рис. 4.14 [40], [64].

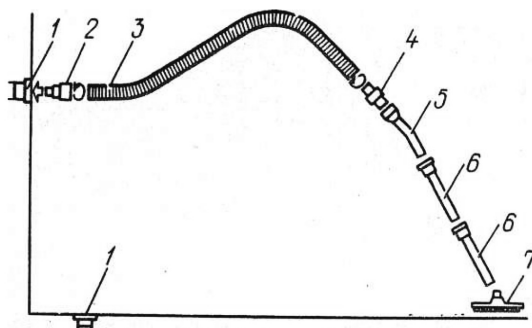


Рис. 4.14. Пример компоновки пылеуборочного инструмента:
1 – клапаны для присоединения шлангов; 2 – присоединительный штуцер;
3 – шланг; 4 – штуцер; 5 – изогнутый наконечник; 6 – трубоудлиннитель;
7 – насадок для твердых полов

4.2.1. Пылесосные насадки

Пылесосный насадок должен быть:

- высокопроизводительным, обеспечивать полную очистку наибольшей площади в единицу времени;
- экономичным по расходу воздуха и энергии на преодоление аэродинамических сопротивлений;
- легким, небольшого размера;
- удобным в работе (его перемещение по поверхности не должно затруднительным);
- простым по устройству;

– надежным и долговечным в работе.

По принципу действия пылеуборочные насадки подразделяются на четыре группы:

- 1) щеточные, имеющие на рабочей поверхности ворс для механического отрыва от очищаемой поверхности;
- 2) коллекторные, с ровной рабочей поверхностью без ворса;
- 3) механические, являющиеся разновидностью щеточных. При перемещении насадка щетки приводятся в действие при помощи какого-либо привода;
- 4) сдуво-отсасывающие, с подводом к очищаемой поверхности сжатого воздуха.

Ряд проектных организаций и конструкторских бюро провел работы по созданию насадков для пневматического удаления пыли. Был использован и зарубежный опыт [93].

Первую попытку сделал в 1940 г. Промстройпроект. По его чертежам были изготовлены щеточные насадки для уборки зданий. Пробная производственная проверка этих насадков показала их недостаточную эффективность и выявила необходимость конструктивной доработки. Исследования, проведенные в лаборатории сантехуправления Главсантехмонтажа в 1953 г., подтвердили низкую эффективность насадков конструкции Промстройпроекта. Лабораторией промышленной вентиляции Свердловского института охраны труда был проведен ряд исследований [93], в результате которых была установлена низкая эффективность и неэкономичность использования пылесосных насадков систем пневмотранспорта, бытовых пылесосов, щеток конструкции Промстройпроекта для систем централизованной пылеуборки (ЦПУ).

Щеточные насадки, широко применяемые для уборки пыли в жилых и общественных зданиях, засоряются пылью, быстро изнашиваются. Попытки использовать их в промышленности оказались неудачными.

Исследования показали, что производительность и эффективность уборки значительно повышаются, если внутри насадков установлены вращающиеся щетки и другие приспособления для увеличения интенсивности уноса пыли с поверхности (рис. 4.15).

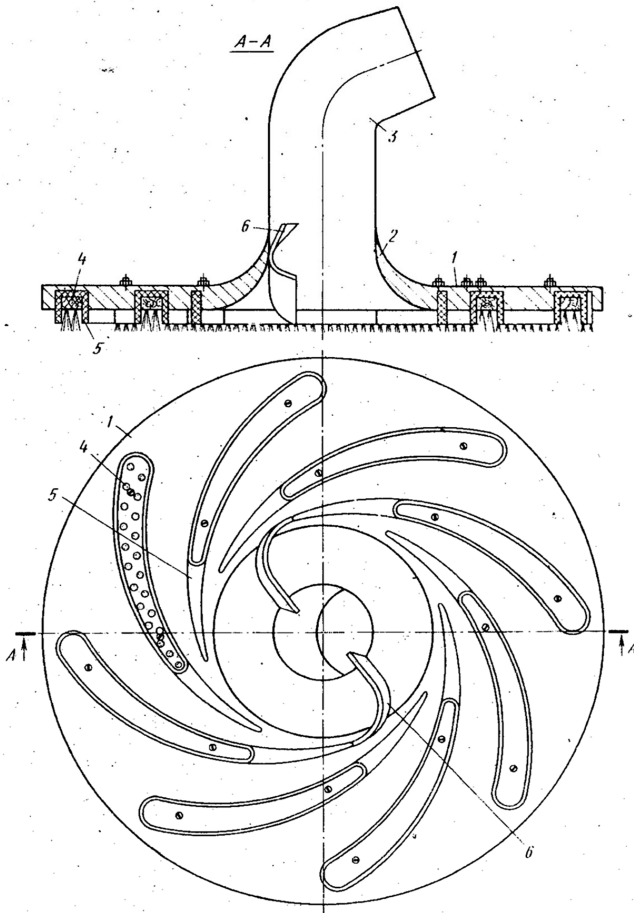


Рис. 4.15. Вихревой пылесосный насадок:
1 – корпус; 2 – коллектор; 3 – выходной патрубок; 4 – серповидные щетки;
5 – резиновые чулочки; 6 – раскручиватели потока

Однако эти устройства усложняют и утяжеляют насадки. Такие насадки труднее изготовить, они ненадежны в работе и требуют частого ремонта, а их значительная масса быстро утомляет уборщика.

Насадки работают при повышенных расходах воздуха и имеют большое аэродинамическое сопротивление.

Смывовсасывающие, сдувовсасывающие и вибрационные насадки увеличивают производительность и эффективность пылеуборки при небольших расходах воздуха, но они требуют дополнительного устройства для подвода сжатого воздуха, воды или электроэнергии. Вибрационные насадки, кроме того, включают в себя вибраторы. Все это усложняет конструкцию, утяжеляет насадки и снижает надежность их работы [93].

Указанным требованиям удовлетворяют обычные щелевые (коллекторные) насадки и насадки с полками. Размеры и конструкции насадка зависят от характера увлечения пыли потоком воздуха, ее физико-химических свойств, вида, характера и месторасположения очищаемой поверхности.

Сведения о типах насадков, наиболее распространенных в промышленности, приведены на рис. 4.16 и 4.17 [93].

Коллекторные насадки бывают однополочными и двухполочными. В однополочных эвакуация пыли с убираемой поверхности происходит за счет действия всасывающего факела воздушного потока с фронтальной стороны, по ходу движения насадка. В двухполочных уборка пыли и просыпи осуществляется в условиях слияния встречных потолков с фронтальной и тыльной стороны. Коллекторные насадки выгодно отличаются от механических, сдувоотсасывающих и вибрационных конструкций надежностью работы, а также простотой изготовления и эксплуатации [93].

Основопологающей задачей изучения пылеуборочных насадков стало установление факторов, определяющих энергозатраты на уборку пыли и нахождение путей совершенствования конструкции насадка, обеспечивающего минимальные затраты энергии на уборку пыли и просыпи. Такими факторами являются расход отсасывающего воздуха и коэффициент его местного сопротивления. Минимизация расхода воздуха через насадок, обеспечивающего полное удаление пыли с поверхности, и снижение потерь давления в пылеуборочном насадке послужили вектором, определяющим направление изучения рабочих процессов в насадках.

4.2. Пылеуборочный инструмент

Насадок		Назначение	Вид пыли	Скорость воздуха в щели, м/с	Отсос воздуха, м ³ /ч	Аэродинамическое сопротивление, Па
Тип	Эскиз					
1	2	3	4	5	6	7
ПН-1		Для очистки оборудования строительных конструкций, стен	Легкая	35	125	1700
			Средняя	50	180	3600
			Тяжелая	65	230	6000
ПН-2		То же	Легкая	35	60	1600
			Средняя	50	90	3600
			Тяжелая	65	115	5800
ПН-3		Для очистки полов	Легкая	35	155	2300
			Средняя	50	220	4800
			Тяжелая	65	285	8100
ПН-4		То же	Легкая	35	200	860
			Средняя	50	290	1800
			Тяжелая	65	380	2800
ПН-5		”	Легкая	35	190	510
			Средняя	50	270	970
			Тяжелая	65	350	1600
ПН-6		”	Легкая	35	260	950
			Средняя	50	380	2000

Рис. 4.16. Пылесосные насадки для уборки пыли в производственных помещениях

2) исследования процесса взаимодействия пылевидных частиц, находящихся на убираемой поверхности, со всасывающим факелом пылеуборочного насадка и изучение влияния конструктивных особенностей насадка на эффективность процесса уборки пыли.

Анализ первоисточников показал, что аэродинамические характеристики процесса движения воздуха в корпусе пылеуборочного насадка наиболее полно исследованы А. А. Курниковым [53]. В работах Курникова приведены результаты экспериментального исследования 65 насадков. При этом для каждой группы были установлены коэффициенты местного сопротивления и общее сопротивление при необходимом расходе воздуха. Аэродинамическая оценка насадков в свободном положении производилась по двум показателям:

– сопротивлению в насадке, приведенному к некоторому стандартному расходу воздуха $L = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$ при плотности воздуха $\rho_v = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$:

$$p_0 = p \left(\frac{120}{L} \right)^2; \quad (4.1)$$

– коэффициенту местного сопротивления, который определялся как отношение потерь полного давления в насадке к динамическому давлению в патрубке:

$$\zeta = \frac{p_{\text{ст}} - p_{\text{дин}}}{p'_{\text{дин}}} = \frac{p}{p'_{\text{дин}}}, \quad (4.2)$$

где p – потери полного давления в насадке; $p_{\text{ст}}$ – измеряемое статическое давление; $p_{\text{дин}}$ – динамическое давление в сечении измерения; $p'_{\text{дин}}$ – динамическое давление в патрубке насадка.

На моделях насадков (рис. 4.18), выполненных из оргстекла, были проведены экспериментальные исследования влияния формы боковой образующей насадка и центрального угла раскрытия на коэффициент местного сопротивления и пылеуборочную способность при различных расходах воздуха (табл. 4.1) [53].

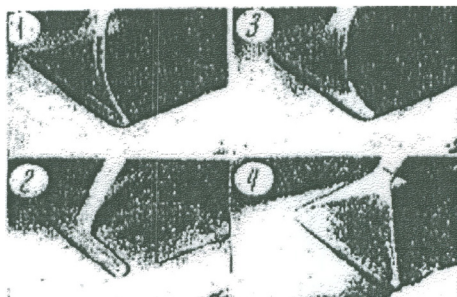


Рис. 4.18. Модели насадков: 1 – насадок с боковой образующей, рассчитанной методом А. И. Стасенко; 2 – насадок с боковой образующей, рассчитанной по уравнению Витошинского; 3 – насадок с боковой образующей, очерченной по дуге окружности с радиусом 180 мм и являющейся касательной к выходному патрубку; 4 – имеет форму боковой образующей в виде прямой с центральным углом раскрытия 90°

Таблица 4.1

Значения коэффициентов местного сопротивления пылеуборочных насадков

№ насадка	Центральный угол раскрытия, град.	Коэффициент местного сопротивления, рассчитанный по формуле (4.2)
1	90	0,16
2	180	1,04
3	90	0,2
4	90	0,28

На основании результатов исследований было установлено, что сопротивление насадка в свободном положении зависит от формы щели; при этом величина коэффициента сопротивления насадка принимает минимальные значения, когда боковые поверхности имеют криволинейную форму и центральный угол раскрытия – 90° . Для уменьшения потерь полного давления необходимо плавно изменять

(уменьшать) площадь поперечного сечения от всасывающей щели до выходного патрубка. При приближении насадка к обрабатываемой поверхности потери полного напора возрастают.

Однако А. А. Курников рассматривает движение пылевоздушного потока в насадках как движение однородной газовой среды, объясняя это сравнительно невысокой концентрацией пыли ($\mu = 0,5$ кг/кг) и, следовательно, не учитывает потерь давления на транспортирование твердой фазы через насадок, что является не корректным, так как массовая концентрация пыли в системах ЦПУ предприятий строительных материалов может достигать 7 кг/кг.

В работах в области исследования пылеародинамических характеристик насадков, применяемых в системах ЦПУ, проведенных в Белгородском государственном технологическом университете им. Шухова В. А. Минко, Н. В. Сапелиной, М. И. Кулешовым, С. А. Трищенко, при определении сопротивления насадка [72] было учтено наличие в потоке воздуха, просасываемого через насадок, твердых частиц пыли:

$$\Delta H = \Delta H_0 (1 + k\mu), \quad (4.3)$$

где ΔH_0 – сопротивление насадка при движении чистого воздуха; k – коэффициент, учитывающий наличие в потоке воздуха твердых частиц пыли; μ – массовая концентрация материала в потоке воздуха, просасываемом через насадок.

В лаборатории промышленной вентиляции Белгородского государственного технологического университета проведены испытания по определению сопротивления насадка на чистом воздухе и определены коэффициенты k различных типов пылеуборочных насадков, некоторые из них представлены в табл. 4.2.

Второе направление исследования посвящено изучению процесса взаимодействия пылевидных частиц, находящихся на убираемой поверхности, со всасывающим факелом пылеуборочного насадка с учетом условий отрыва и уноса частиц и влияния конструктивных особенностей насадка на эффективность процесса уборки.

Таблица 4.2




Соппротивление насадков на чистом воздухе и коэффициент k

Тип насадка	k	ΔH_0 , Па
Насадок для уборки пыли с оборудования	0,8	1800
Насадок для уборки пыли с пола	0,9	3000
Насадок со щеткой для уборки пыли с пола	0,9	3500
Насадок с перфорированной полкой для уборки пыли с пола	0,9	2200

Отечественными и зарубежными исследователями довольно обстоятельно изучены процессы флюидации порошков, гидромеханических технологий, механики метелей. Имеющиеся данные позволяют определить, так называемую, критическую скорость потока, при которой начинают двигаться отдельные частицы, однако, полученные зависимости носят преимущественно эмпирический характер. В табл. 4.3 приведены насадки, которые предлагает использовать немецкая компания *Wieland*, выпускающая промышленные пылесосы [128], [136].







Таблица 4.3

Насадки фирмы *Wieland*

Название	Внешний вид	Назначение
Круглый концевой		Для чистки оборудования
Плоский концевой		Для чистки щелей в обо- удовании
Треугольный прямой со сталь- ными губками		Для уборки просypeй и остатков сыпу- чего материала

4.2. Пылеуборочный инструмент

Окончание табл. 4.3

Название	Внешний вид	Назначение
Треугольный угловой со стальным скребком		Для удаления липкой грязи
Треугольный угловой с резиновыми губками		Для удаления жидкостей
Шириной 300 мм с резиновыми губками		Для уборки пола
Шириной 500 мм с резиновыми губками		Для уборки пола
Щетка с радиусом закругления 120°		Для очистки поверхности труб
Щетка угловая		Для очистки потолков, окон, оборудования

Для сбора большого количества материала используют сопла большого (до 150 мм) диаметра (рис. 4.19).



Рис. 4.19. Сбор просыпей соплом

Если сопло погружать глубоко в материал, перекрывается поток воздуха, без которого невозможна работа системы пневмотранспорта. Для этих случаев разработаны насадки с подсосом воздуха (рис. 4.20).

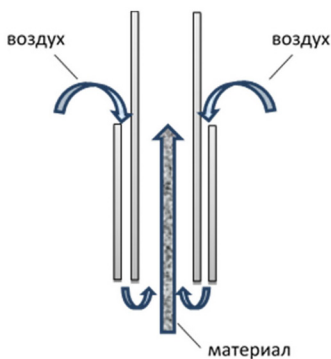


Рис. 4.20. Сопло с подсосом воздуха

4.2.2. Рукоятки

Рукоятка (державка) соединяет пылесосный насадок с гибким шлангом и служит для удобства работы с насадком. Рукоятки изготавливают из дюралюминиевых труб диаметром 50 мм с толщиной стенок не более 1,5 мм. Рукоятка для уборки пыли с пола показана на рис. 4.21.

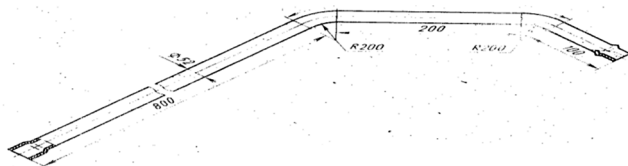


Рис. 4.21. Рукоятка для присоединения насадка при уборке пыли

Длина рукоятки для уборки пола – 1100 мм; при уборке пыли с поверхности стен, потолка, оборудования, коммуникаций длину рукоятки принимают в соответствии с условиями работы. К длинному концу рукоятки крепится насадок, а к короткому присоединяется шланг. При уборке стен, потолков и других поверхностей следует применять трубы, длина которых отвечает условиям удаления пыли. Следует стремиться к максимальному сокращению массы рукоятки, но так, чтобы это не снижало удобство работы. На рис. 4.22 и 4.23 показаны рукоятки, которые выпускает шведская компания DISAB [128].



Рис. 4.22. Рукоятка с изгибом



Рис. 4.23. Рукоятка с усиленным изгибом

Для удаления пыли с кабельных трасс, с воздухопроводов, расположенных на высоте, используют телескопические рукоятки длиной от 1,2 до 4,8 м (рис. 4.24).

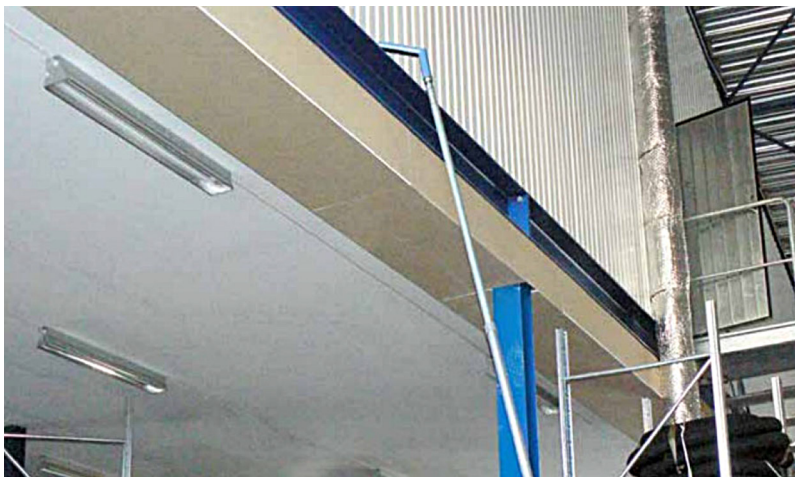


Рис. 4.24. Рукоятка телескопическая

Места соединения насадки с рукояткой и рукоятки со шлангом должны исключать возможность подсоса воздуха. Наиболее простые и удобные варианты этих соединений показаны на рис. 4.25. Швы и выступающие части на внутренней поверхности должны быть сглажены.

4.2. Пылеборочный инструмент

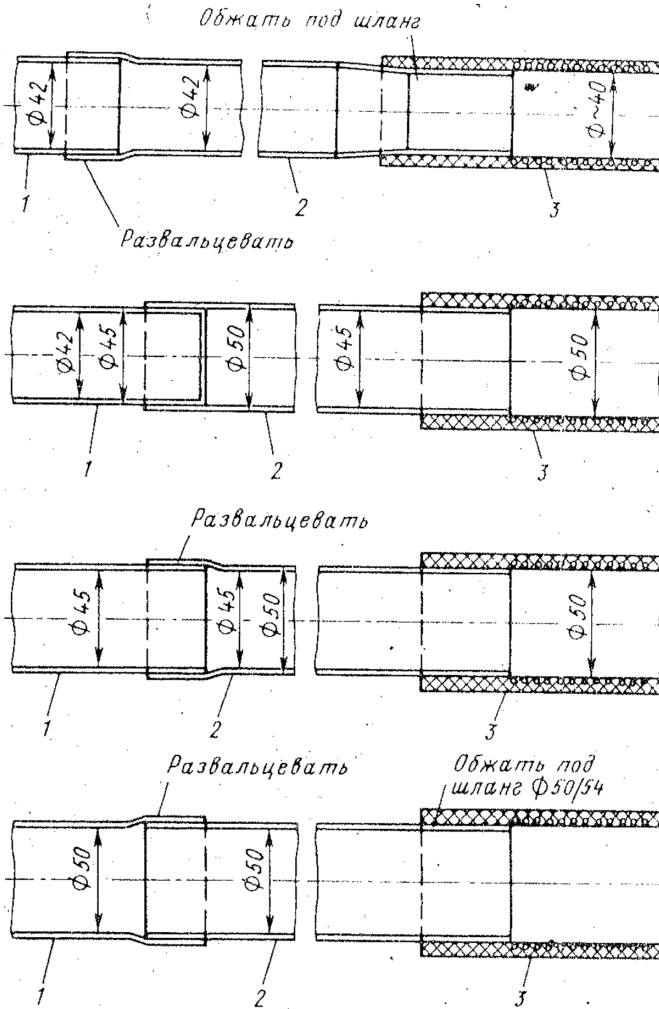


Рис. 4.25. Варианты соединения пылесосного насадка с рукояткой рукоятки со шлангом:
 1 – патрубок насадка; 2 – рукоятка; 3 – пылесосный шланг

4.2.3. Пылесосные шланги

Гибкий шланг предназначен для присоединения пылесосного насадка к сети пневматической транспортировки пыли. К пылесосным шлангам систем ЦПУ предъявляются следующие требования:

- способность изгибаться без остаточной деформации;
- не подвергаться деформациям от вакуума в системе и от временных нагрузок;
- внутренняя поверхность шланга должна быть гладкой;
- масса 1 м шланга должна быть минимальной.

Из выпускаемых ранее в России шлангов наиболее широко в системах ЦПУ применялись шланги-рукава диаметром 38 и 50 мм для промышленных пылесосов.

Один пылесосный шланг получался путем соединения с помощью цилиндрических вставок трех рукавов. Конец шланга, подсоединяемый к штуцер-пробке, должен иметь наконечник.

Для защиты шлангов от повреждений и быстрого износа при эксплуатации применяются резиновые кольца, которые располагаются на шланге через 400 мм (рис. 4.26).

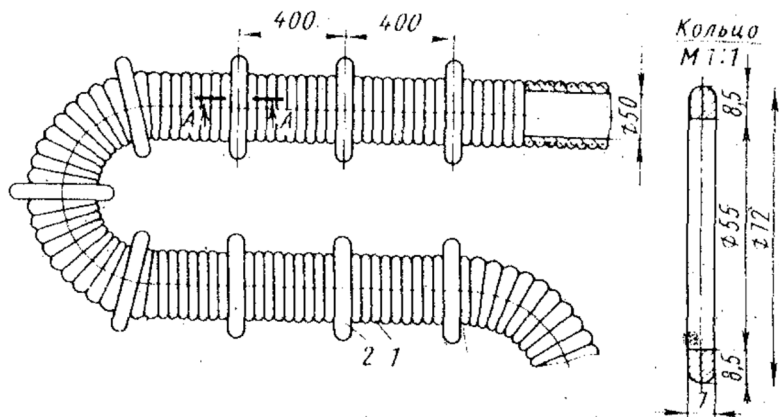


Рис. 4.26. Расположение колец для защиты наружной поверхности шланга

Потери давления в шлангах диаметром 50 мм в виде функциональных зависимостей коэффициента сопротивления трения $\lambda_{\text{тр}}$ от скорости воздуха $v_{\text{шл}}$ и числа Рейнольдса Re приведены на рис. 4.27.

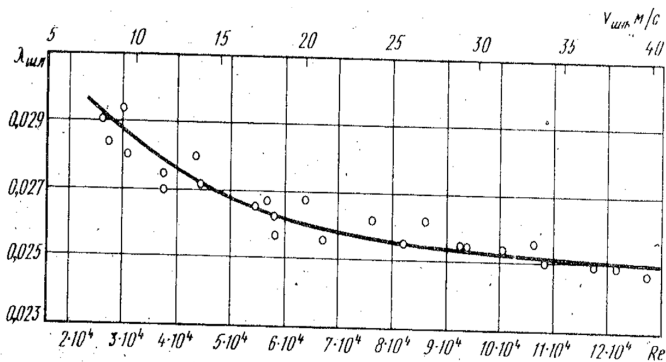


Рис. 4.27. График зависимости коэффициента сопротивления трения $\lambda_{\text{тр}}$ от скорости воздуха $v_{\text{шл}}$ и числа Рейнольдса Re

С увеличением Re и $v_{\text{шл}}$ коэффициент сопротивления трения $\lambda_{\text{тр}}$ снижается, достигая предельного значения 0,025 при $v_{\text{шл}} > 40$ м/с. В практических расчетах можно принимать $\lambda_{\text{тр}} = 0,027-0,026$ при $v_{\text{шл}} = 15-20$ м/с, а при $v_{\text{шл}} = 20-30$ м/с $\lambda_{\text{тр}} = 0,026-0,025$.

Транспортирование пылевоздушной среды по шлангам приводит к достаточно большой потере давления. Тем не менее применять шланги диаметром более 50 мм было нецелесообразно, пока промышленность не освоила их изготовление в соответствии с указанными выше требованиями. Характеристики современных шлангов для вакуумной пылеуборки, выпускаемых фирмой DISAB, представлены в табл. 4.4.

Длина таких шлангов составляет 10 м. При необходимости получить шланг большей длины для их соединения применяют специальные фитинги (рис. 4.28, а). Для присоединения шлангов к штуцер-клапанам используют адаптеры (рис. 4.28, б).

Таблица 4.4

**Характеристики шлангов для вакуумной пылеуборки,
выпускаемых фирмой DISAB [128]**






Название	Вид	Диаметр, мм	Вес, кг/м	Температурный диапазон, °С	Назначение
Шланг полиуретановый Vibratan		38	0,46	от -40 °С до +90 °С	Для работы с абразивными материалами
		51	0,71		
		60	0,84		
		76	1,06		
		102	1,48		
Шланг полиуретановый Tellatan		38	0,39	от -40 °С до +90 °С	Для большинства очистительных работ
		51	0,45		
		60	0,5		
		76	0,61		
Шланг пластиковый Vibraflex		38	0,29	от -40 °С до +60 °С	Для общей очистки
		51	0,42		
		60	0,54		
Шланг резиновый, голубой, облегченный		51	0,95	от -30 °С до +85 °С	Для работы с бетоном и известняком
		60	1,11		
		76	1,30		
		102	1,85		
Шланг резиновый для тяжелых нагрузок		76	2,0	от -30 °С до +90 °С	Для работы со шламом, камнями
		102	2,9		
		127	3,9		
		152	4,5		



Рис. 4.28. Манжета для соединения шлангов – а; адаптер для шланга – б

Стандартный комплект для пылеборки показан на рис. 4.29.

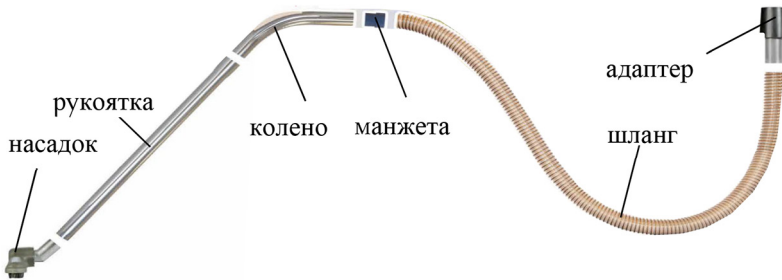


Рис. 4.29. Комплект для пылеборки

4.3. Трубопроводы

4.3.1. Конструирование системы трубопроводов

Для присоединения гибких пылесосных шлангов сеть трубопроводов снабжают штуцер-клапанами (рис. 4.30).

Более удобны в эксплуатации самозакрывающиеся штуцера-клапаны. При наличии пружины клапан срабатывает независимо от положения штуцера (рис. 4.31).

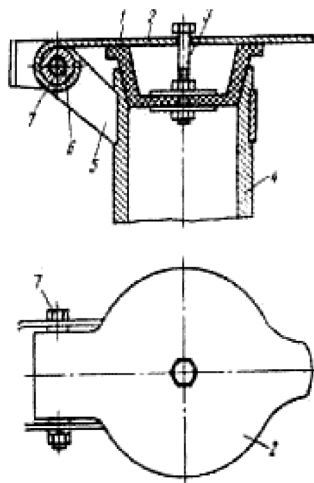


Рис. 4.30. Штуцер-клапан: 1 – резиновая конусная пробка; 2 – крышка; 3 – болт крепления пробки; 4 – корпус; 5 – хомут; 6 – втулка, ограничивающая откидывание крышки; 7 – болт-ось

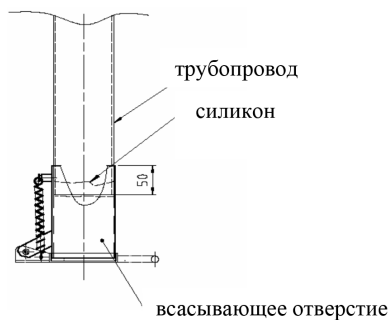


Рис. 4.31. Самозакрывающийся штуцер-клапан

Количество штуцер-клапанов выбирают в зависимости от длины гибкого пылесосного шланга. Размещать штуцера необходимо таким образом, чтобы можно было производить уборку в любой точке обслуживаемого помещения (рис. 4.32).

При выборе трассировки сети трубопроводов необходимо стремиться к тому, чтобы горизонтальные участки имели минимальную длину. Предпочтительнее схемы, при которых побудитель тяги и пылеотделяющее устройство размещаются в центре зоны обслуживания ЦПУ.

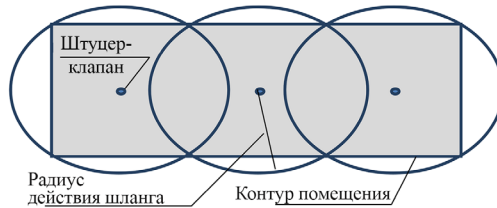


Рис. 4.32. Расположение штуцер-клапанов в помещении

Пылепроводы систем ЦПУ выполняют обычно из стальных бесшовных труб с толщиной стенок 3,5–4 мм. Соединения допускаются только муфтовые со сваркой по торцам муфт.

В конце горизонтальных ответвлений необходимо предусматривать прочистки трубопроводов на случай их засорения (рис. 4.33).

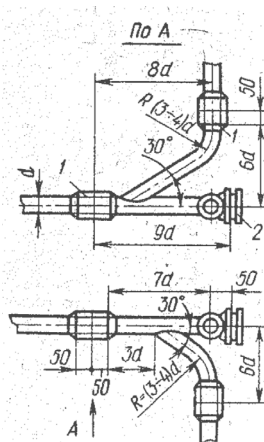


Рис. 4.33. Узел магистрального трубопровода концевой:
1 – муфта; 2 – штуцер для очистки; 3 – резиновая прокладка; 4 – фланец

Для предотвращения засорения фасонных частей трубопроводов (отводов, тройников и т. д.), а также для уменьшения потерь давления в них все повороты магистрали должны иметь радиус, равный 3–4 диаметрам трубопровода. Ответвление к магистральному трубопроводу присоединяют под углом 30° (рис. 4.34).

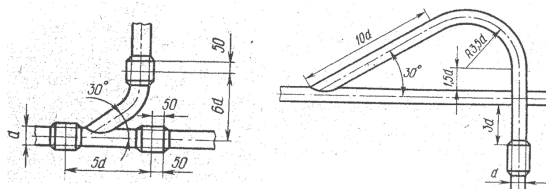


Рис. 4.34. Схемы узлов трубопроводов:
а – с верхним подключением; б – с нижним подключением

При проектировании систем трубопроводов на предприятиях по производству строительных материалов следует учитывать, что перемещаемый материал обладает высокой абразивностью. Это приводит к быстрому изнашиванию трубопроводов, а особенно быстро выходят из строя тройники и отводы. В таких случаях рекомендуется усиливать отводы, приваривая с наружной стороны пластину или швеллер.

Находит свое применение и решение использовать вместо отвода тройник с пробкой (рис. 4.35). Срок службы такого узла увеличивается за счет того, что происходит трение материала не о стенки трубопровода, а материал, который лежит в тройнике.



Рис. 4.35. Движение материала в тройнике с пробкой

Шведская фирма *DISAB* использует трубу стальную оцинкованную с толщиной стенки 2 мм. Коэффициент трения внутренней поверхности такой трубы меньше, чем стальных бесшовных труб, выпускаемых в России.

4.3. Трубопроводы

В местах отводов *DISAB* применяет шланг резиновый в текстильной оболочке, армированный стальной пружиной и текстилем, с износостойкой резиной внутри, с гладкой наружной поверхностью (рис. 4.36). Толщина стенки шланга 9 мм [128].

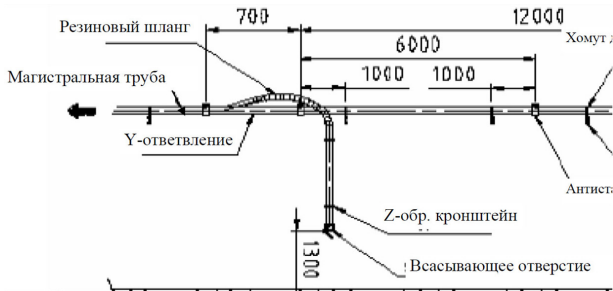


Рис. 4.36. Узел нижнего подключения с резиновым шлангом

Все соединения элементов трубопроводов шведской фирмы быстроразъемные на хомутах (рис. 4.37).

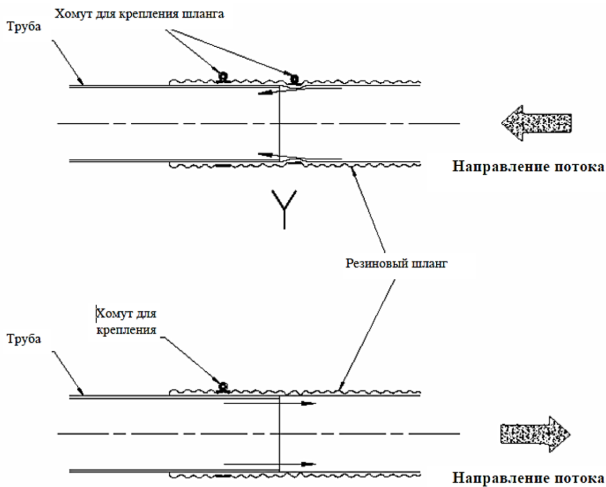


Рис. 4.37. Узлы соединения на хомутах

При движении абразивного материала по горизонтальному трубопроводу изнашивается нижняя часть трубы, так как большая часть материала перемещается непосредственно по дну (рис. 4.38).



Рис. 4.38. Движение материала в стеклянном воздуховоде

После эксплуатации шведских трубопроводов в течение определенного времени, происходит истончение нижней части воздуховодов. Быстроразъемные соединения позволяют отсоединить трубу, перевернуть ее и закрепить хомутами. Трубопровод готов к дальнейшей эксплуатации, это значительно увеличивает срок его службы. На рис. 4.39 и 4.40 приведены примеры систем пневмотранспорта из элементов фирмы *DISAB*.



Рис. 4.39. Система всасывающего пневмотранспорта с резиновыми шлангами



Рис. 4.40. Узел обхода препятствия

Все узлы установки следует надежно заземлять для предотвращения образования зарядов статического электричества и электризации пыли. Заземление необходимо выполнять путем присоединения системы к контуру заземления обслуживаемого здания (рис. 4.41 и 4.42).



Рис. 4.41. Антистатическое заземление, интегрированное в шланг

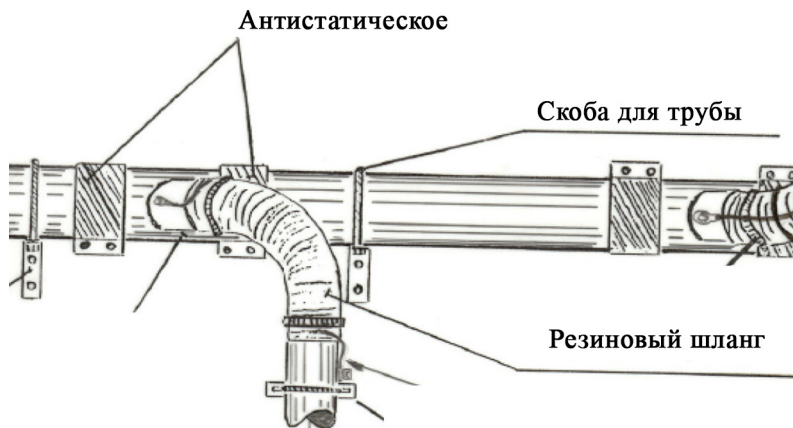


Рис. 4.42. Антистатическое заземление трубопровода

Использование для монтажа сети трубопроводов стеклянных или пластмассовых труб может быть допущено после разработки мероприятий, обеспечивающих надежное заземление всех элементов установки и исключая возможность накопления зарядов статического электричества.

После завершения монтажа побудителя тяги, пылезadržивающего устройства и сети трубопроводов система ЦПУ должна быть испытана на герметичность.

4.3.2. Потери давления в отводах

В изогнутых трубах и каналах (коленах, отводах) вследствие искривления течения потока появляются центробежные силы, направленные от центра кривизны к внешней стенке трубы. Этим обуславливается повышение давления у внешней стенки и понижение его у внутренней стенки при переходе потока из прямолинейного участка трубопровода в изогнутый (до полного поворота). Поэтому скорость потока соответственно будет меньше у внешней стенки и больше у внутренней (рис. 4.43).

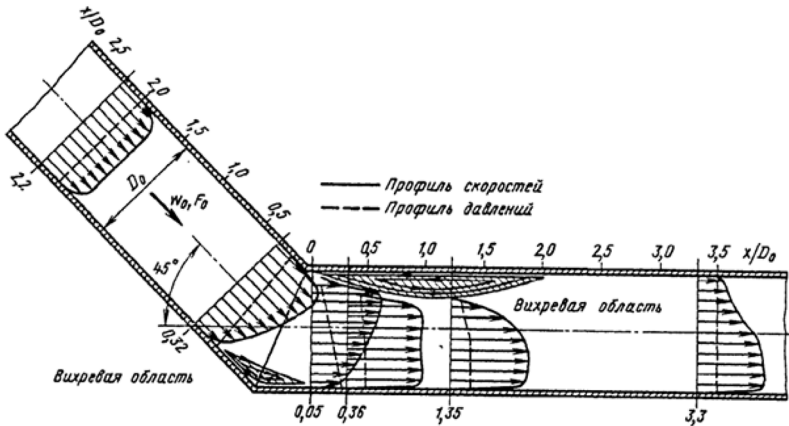


Рис. 4.43. Схема изменения профилей скоростей и давлений в колене и в прямой трубе за ним

Таким образом, в этом месте вблизи внешней стенки проявляется диффузорный эффект, а вблизи внутренней стенки – конфуззорный [41]. Переход потока из изогнутой части в прямолинейную (после поворота) сопровождается обратными явлениями: диффузорным эффектом вблизи внутренней стенки и конфуззорным вблизи внешней.

Диффузорные явления приводят к соответствующему отрыву потока от обеих стенок. При этом отрыв от внутренней стенки усиливается стремлением потока двигаться по инерции в изогнутом участке по направлению к внешней стенке. Образованная вследствие отрыва от внутренней стенки вихревая зона распространяется далеко вперед и в ширину, существенно сокращая сечение основного потока.

Появлением центробежной силы и наличием пограничного слоя у стенок объясняется возникновение в изогнутой трубе вторичного (поперечного) течения, т. е. образование так называемого парного вихря, который налагается на главный поток, параллельный оси канала, и придает линиям потока винтообразную форму (рис. 4.44).

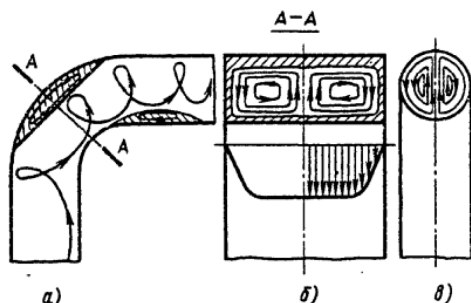


Рис. 4.44. Парный вихрь в отводе:
 а – продольный разрез; б – поперечное сечение (прямоугольный канал);
 в – поперечное сечение (труба круглого сечения)

Основная часть потерь давления в изогнутых трубах вызывается вихреобразованием у внутренней стенки, которое вместе со вторичными потоками определяет в основном и характер распределения скоростей за поворотом.

Коэффициент сопротивления изогнутых труб и структура потока в них изменяются под влиянием факторов, определяющих степень турбулентности потока и форму профиля скорости на входе $Re = w_0 D_r / \nu$, относительная шероховатость стенок $\bar{\Delta} = \Delta / D_r$, условия входа: относительная длина прямого входного участка l_0 / D_0 , относительное расстояние от предшествующей фасонной части и др.), а также геометрических параметров трубы (угол поворота δ , относительный радиус закругления r / b_0 или $R_0 / D_0 (R_0 / b_0)$ – рис. 4.45, относительная вытянутость поперечного сечения a_0 / b_0 , отношение площадей входа и выхода F_1 / F_0 и т. п.).

При прочих равных условиях изогнутая труба создает наибольшее сопротивление в том случае, когда кромка изгиба из внутренней стенке острая; отрыв потока от этой стенки происходит наиболее интенсивно. При угле поворота трубы $\delta = 90^\circ$ область отрыва потока у внутренней стенки за поворотом достигает 0,5 ширины трубы. Следовательно, интенсивность вихреобразования и сопротивление изогнутой трубы (канала) тем значительнее, чем больше

угол поворота. Скругление кромок колена (особенно внутренней) значительно смягчает условия отрыва потока, следовательно, снижает сопротивление.

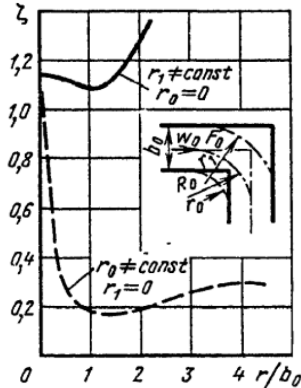


Рис. 4.45. Схема скругления колена и зависимость коэффициента сопротивления колена от радиуса закругления r/b_0

Если внешнюю кромку колена оставить острой (радиус внешнего закругления $r_1 = 0$), а закруглять только внутреннюю (увеличивать радиус внутреннего закругления r_0), то минимальное сопротивление колена с поворотом на 90° будет получено при $r_0/b_0 = 1,2 - 1,5$. При дальнейшем увеличении r_0/b_0 сопротивление начнет заметно возрастать. Такой рост сопротивления объясняется тем, что при значительном округлении внутренней кромки в месте изгиба существенно увеличивается площадь поперечного сечения и соответственно падает скорость. Это усиливает диффузорный отрыв потока, который возникает в месте перехода от входного участка к колену.

Скругление внешней стенки при сохранении внутренней кромки острой ($r_0 = 0$) не приводит к заметному снижению сопротивления колена. Значительное увеличение радиуса кривизны внешней стенки вызывает даже повышение сопротивления колена. Это указывает на нерациональность скругления одной только внешней

стенки (при острой внутренней кромке), так как при этом уменьшается площадь поперечного сечения потока в месте его поворота и увеличиваются диффузорные потери, возникающие при переходе из колена к выходному участку трубопровода.

Минимальное сопротивление создает колено, у которого $r_1/b_0 = r_0/b_0 + 0,6$ (колено оптимальной формы), а близкое к минимуму – отвод или «нормальное колено», у которого $r_1/b_0 = r_0/b_0 + 1,0$. Так как отвод технически легче выполнить, то в большинстве случаев он может заменить оптимальное колено.

Изменение соотношения площадей F_1/F_0 входа и выхода из колена изменяет его сопротивление. При увеличении площади сечения за поворотом возрастает диффузорный эффект, что усиливает отрыв потока и вихреобразование (увеличивает вихревую зону). Вместе с тем при постоянном расходе скорость потока в выходном участке уменьшается. Эффект от уменьшения скорости, выражающийся в уменьшении потерь давления, сказывается при увеличении отношения F_1/F_0 до определенных пределов сильнее, чем эффект от увеличения вихревой зоны, приводящий к возрастанию потерь. Вследствие этого общие потери при расширении сечения колена в определенных пределах уменьшаются.

Общий коэффициент сопротивления колен и отводов для удобства инженерных расчетов в большинстве случаев определяется как сумма коэффициентов местного сопротивления ζ_m и сопротивления трения $\zeta_{тр}$ поворота:

$$\zeta = \zeta_m + \zeta_{тр}, \quad (4.4)$$

где $\zeta_{тр} = \lambda l/D_r$ вычисляется как ζ прямых участков; λ – коэффициент сопротивления трения; l – длина колена или отвода по оси.

Для гладкостенных труб λ принимается по рис. 4.46 в зависимости от числа Re и относительной шероховатости $\bar{\Delta} = \Delta/D_r$ или по формулам:

$$\text{– при ламинарном режиме (Re} \leq 2000) \lambda = \frac{64}{\text{Re}};$$

– при переходном режиме ($2000 \leq \text{Re} \leq 4000$) $\lambda = f(\text{Re})$ (рис. 4.46, а);

4.4. Выводы

– при турбулентном режиме ($4000 \leq Re \leq 10^5$) (рис. 4.46, б)

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}; \quad (4.5)$$

– при турбулентном режиме (любое $Re > 4000$)

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,64)^2}. \quad (4.6)$$

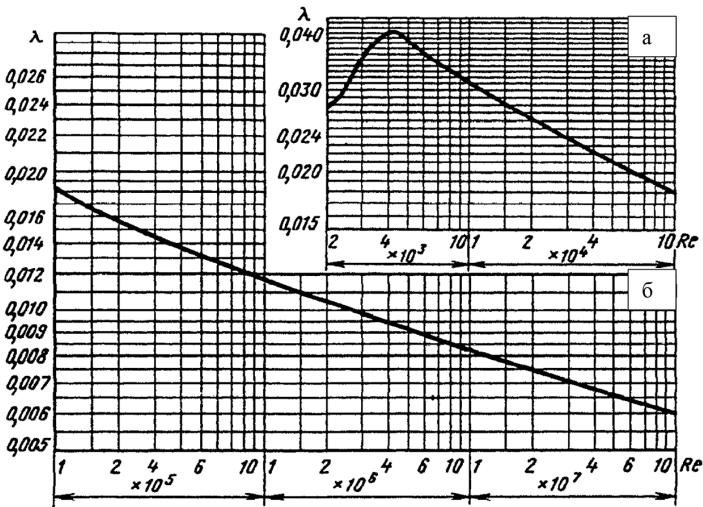


Рис. 4.46. Зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса

4.4. Выводы

1. При проектировании и эксплуатации вакуумных систем обеспыливания необходимо учитывать существенные отличия от других систем, транспортирующих твердые частицы в потоке воздуха.

2. Особенности рассматриваемых систем связаны в первую очередь с назначением – это сбор осевшей пыли с поверхностей в отличие от аспирационных систем, удаляющих пыль, находящуюся во взвешенном состоянии.

3. Осевшая мелкодисперсная пыль обладает большей степенью сцепления между собой и с поверхностями, в связи с чем в системах пылеуборки принимаются более высокие значения скоростей всасывания и транспортирования.

4. Использование гибких шлангов, характеризующихся повышенной шероховатостью и значительными потерями давления в отводах и разветвлениях, а также специальных насадков создает высокие сопротивления в системе, что требует разработки современных методов расчета и подбора оборудования.

Глава 5

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], [61], [66], [69], [92], [94], [121].

5.1. Программа расчета воздуховодов при проектировании вакуумной системы обеспыливания

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

- физико-механические (плотность, размер, коэффициент трения) характеристики транспортируемого материала [34], [35], [36], [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 (рис. 5.1).

Размер частиц, мкм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text"/>	Производительность 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 ³	<input type="text" value="800"/>									
Скорость транспортирования*, м/с	<input type="text" value="20"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text"/>	Производительность по материалу*, кг/м ³	<input type="text"/>	Потери давления на пылеуловителе*, Па	<input type="text"/>			<input type="button" value="расчет"/>
Расчетная скорость транспортирования, м/с	<input type="text"/>									<input type="button" value="выход"/>

Рис. 5.1. Окно для занесения свойств транспортируемого материала

При отсутствии данных или для уточнения скорости транспортирования, предоставленной заказчиком, выполняется расчет скорости по формуле 2.12 или по результатам численного моделирования (гл. 3, п. 3.2). После чего выбирается минимальная скорость воздуха в воздуховоде (рис. 5.2).

Размер частиц, мкм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производительность 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 ³	<input type="text" value="800"/>									
Скорость транспортирования*, м/с	<input type="text" value="20"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text"/>	Производительность по материалу*, кг/м ³	<input type="text"/>	Потери давления на пылеуловителе*, Па	<input type="text"/>			<input type="button" value="расчет"/>
Расчетная скорость транспортирования, м/с	<input type="text" value="23"/>									<input type="button" value="выход"/>

Рис. 5.2. 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 пылеборки трехэтажного производственного здания (рис. 5.3).

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

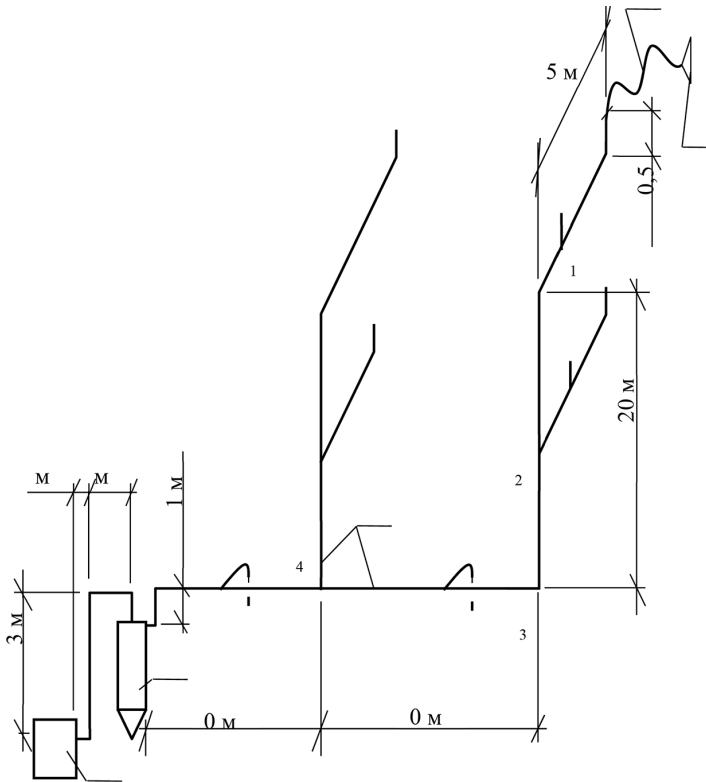


Рис. 5.3. Схема системы вакуумной пылеуборки:
1 – насадок; 2 – гибкий шланг; 3 – воздуховоды; 4 – пылеотделитель;
5 – вакуумный насос

Заносим исходные данные по системе вакуумной пылеуборки: производитель воздуховодов, число одновременно работающих постов (рис. 5.4).

Размер частиц, мкм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производитель воздуховодов	РФ(ГОСТ_3262-75)	Массовая концентрация материала, кг/кг	<input type="text" value=""/>	Число одновременно работающих постов	<input type="text" value="1"/>	<input type="button" value="сброс"/>
Плотность частиц, кг/м ³	<input type="text" value="800"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м ³	<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"/>									

Рис. 5.4. Выбор производителя воздуховода

Заносим необходимую производительность по материалу или массовую концентрацию материала (рис. 5.5.) В системах вакуумной уборки особые требования к производительности по материалу часто не предъявляются, поэтому эти поля можно не заполнять.

Размер частиц, мкм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производитель воздуховодов	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 ³	<input type="text" value="800"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м ³	<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"/>									

Рис. 5.5. Выбор производительности по материалу или массовой концентрации материала

В программе заложены воздухопроводы из стальных водогазопроводных труб (ГОСТ 3262–75) и воздухопроводы для систем вакуумной пылеуборки шведской фирмы *Disab-Tella* [128]. 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.

В системе вакуумной уборки предусмотрен пылеуловитель, данные по потерям давления в нем заносятся в программу (рис. 5.6).

Выбираем расчетную ветку 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.

5.1. Программа расчета воздухопроводов при проектировании вакуумной системы...

Размер частиц, мкм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производительность воздухопроводов	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 ³	<input type="text" value="800"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м ³		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"/>									

Рис. 5.6. Потери давления в пылеуловителе

При работе одного поста данную схему можно разделить на три участка (рис. 5.7):

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

Размер частиц, мкм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производительность воздухопроводов	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 ³	<input type="text" value="800"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м ³		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

Участок	Диаметр воздухопровода, мм	Длина шланга, м	Скорость воздуха, м ³ /ч	Длина воздуховода, м, при наклоне		Под углом вверх	Угол наклона	Кол-во отводов	Кол-во тройников	Расход воздуха, м ³ /ч
				Вертикальное вверх	Горизонтальное					
Шланг	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Потери давления в системе, Па

Рис. 5.7. 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 воздуховод (участок 2–3) принимается одного диаметра;
- воздуховод разделен на участки, количество участков можно принимать разное (для данной системы от 2 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 рис. 5.8 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_з, 2_з–3 и 3–4 (вариант 3).

а)

Размер частиц, мкм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Производительность воздухопроводов	Ре(ГОСТ_3362-78)	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 ³	<input type="text" value="800"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м ³	<input type="text"/>	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 воздуховода, мм	Длина шланга, м	Скорость воздуха, м ³ /с	Длина воздуховода, м, при направлении				Кол-во отводов	Кол-во тройников	Расход воздуха, м ³ /ч
				Вертикальное вверх	Горизонтальное	Под углом вверх	Угол наклона			
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="96,5"/>			<input type="text" value="5"/>		
3	<input type="text" value="50"/>		<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="13"/>			<input type="text" value="3"/>		<input type="text" value="241"/>

Потери давления в системе, Па

5.1. Программа расчета воздухопроводов при проектировании вакуумной системы...

б)

Размер частиц, мм	<input type="text" value="10"/>	Минимальная скорость в воздуховоде, м/с	<input type="text" value="23"/>	Проводимость воздухопроводов	<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 ³	<input type="text" value="800"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м ³	<input type="text"/>	Потери давления на пылеуловителе*, Па	<input type="text" value="1000"/>	<input type="button" value="расчет"/>		
Скорость транспортирования*, м/с	<input type="text" value="20"/>							<input type="button" value="выход"/>		
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	Скорость воздуха, м ³ /ч	Длина воздуховода, м, при направлении		Под углом вверх	Угол наклона	Кол-во отводов	Кол-во тройников	Расход воздуха, м ³ /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="96,5"/>			<input type="text" value="5"/>		
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="3"/>		<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"/>	Проводимость воздухопроводов	<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 ³	<input type="text" value="800"/>	Коэффициент транспортирования частиц	<input type="text" value="0,6"/>	Производительность по материалу*, кг/м ³	<input type="text"/>	Потери давления на пылеуловителе*, Па	<input type="text" value="1000"/>	<input type="button" value="расчет"/>		
Скорость транспортирования*, м/с	<input type="text" value="20"/>							<input type="button" value="выход"/>		
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	Скорость воздуха, м ³ /ч	Длина воздуховода, м, при направлении		Под углом вверх	Угол наклона	Кол-во отводов	Кол-во тройников	Расход воздуха, м ³ /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="66,5"/>			<input type="text" value="3"/>		
3	<input type="text" value="65"/>		<input type="text" value="17"/>		<input type="text" value="30"/>			<input type="text" value="2"/>		<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="3"/>		<input type="text" value="19214"/>

Потери давления в системе, Па

Рис. 5.8. Результаты расчета системы вакуумной пылеуборки: вариант 1 – а; вариант 2 – б; вариант 3 – в

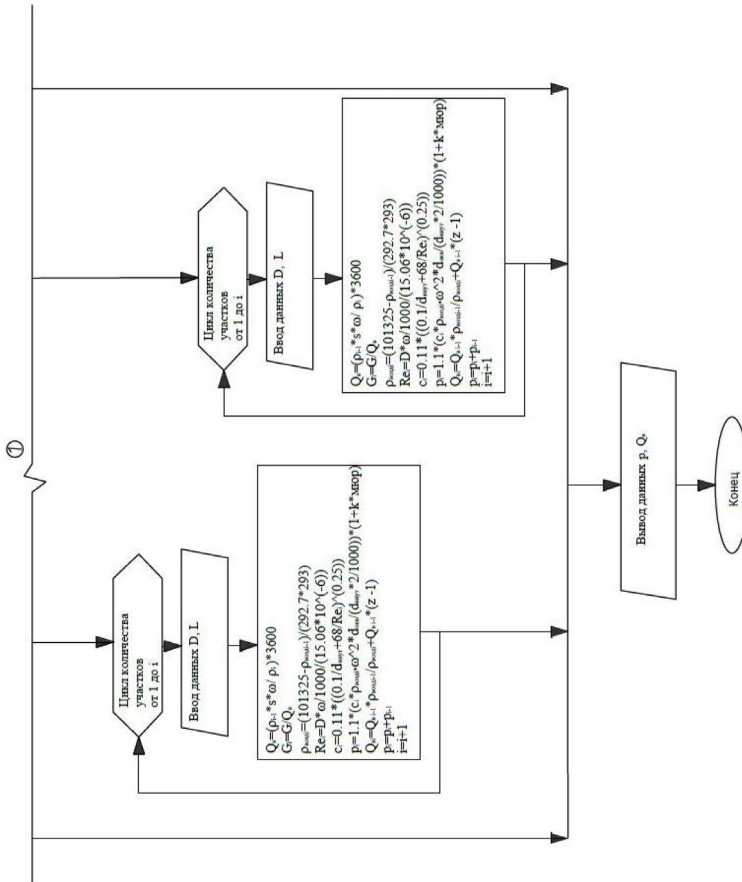


Рис. 5.9. Блок-схема алгоритма расчета систем вакуумной уборки

Если на каком-то участке скорость воздуха становится меньше скорости транспортирования (рис. 5.8, *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 рис. 5.9 приведена блок-схема алгоритма расчета систем вакуумной уборки. Окончательный вариант схемы системы принимается после подбора вакуумного насоса.

5.2. 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 (прил. Б).

Аэродинамические характеристики насосов заменены уравнениями регрессии (см. прил. Б). На рис. 5.10 приведены результаты расчета для вакуумного насоса мощностью 90 кВт. Для каждого насоса исследовано три уравнения регрессии: линейное (рис. 5.10, *а*), полином 2-й (рис. 5.10, *б*) и 3-й степени (рис. 5.10, *в*).

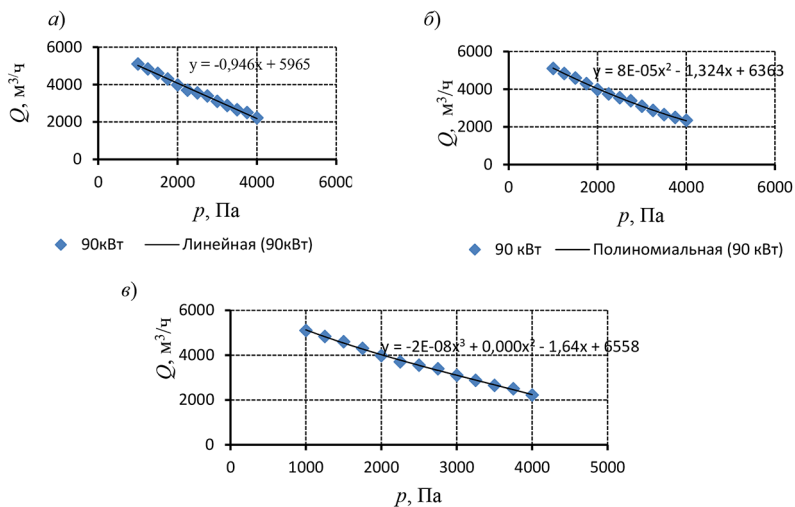


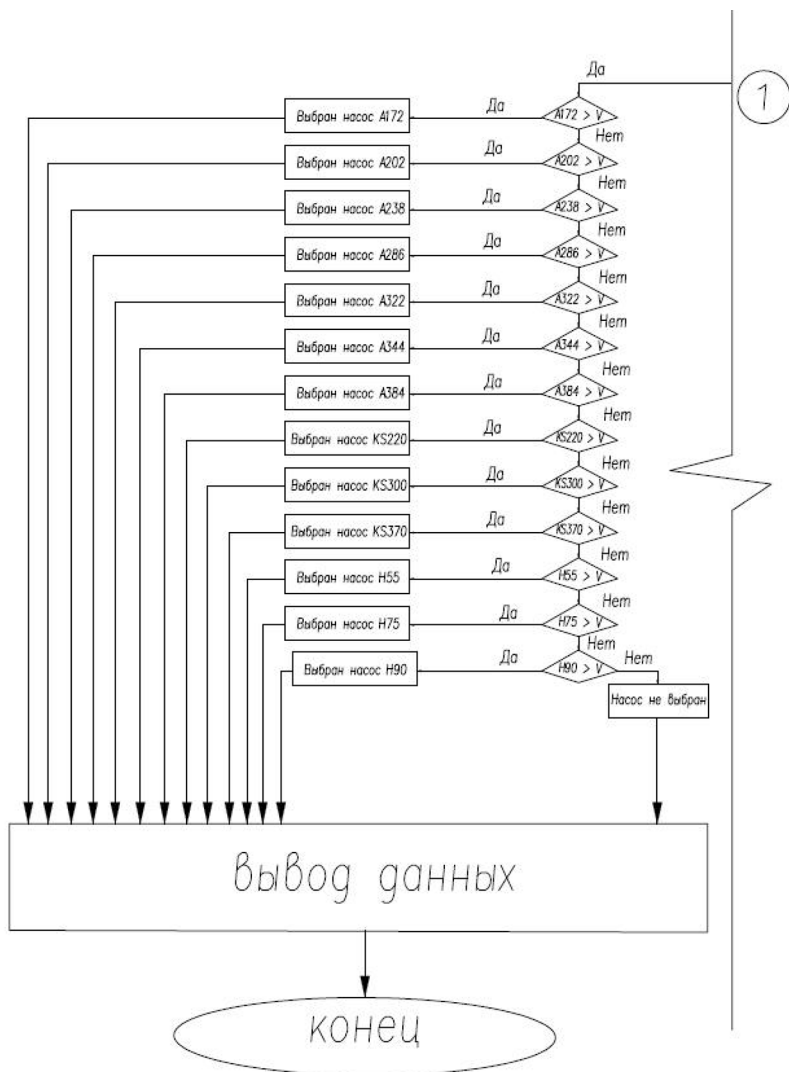
Рис. 5.10. Зависимости расхода воздуха от давления, описываемые полиномами:

а – линейное; б – полином 2-й степени; в – полином 3-й степени

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 (рис. 5.11) 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, $Q, \text{ м}^3/\text{ч}$, и потери давления, $p, \text{ Па}$.



Выполнено ранжирование этих уравнений по сумме квадратов разности или коэффициенту детерминации (табл. 5.1).

Таблица 5.1

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	51 390,78	23 365,43	463 527,20
Ранжирование	3	1	2

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

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

– 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 Н55:

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

– для роторного насоса Н75:

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

– для роторного насоса Н90:

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

где p – потери давления, введенные ранее, Па.

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

Также можно выделить четвертый блок, который вводится 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 невведения исходных данных, также 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 рис. 5.12 показаны результаты подбора вакуумных насосов для вариантов 1 и 2 п. 5.1 расчета воздухопроводов систем вакуумной пылеуборки.

Исходные данные	Управление	Исходные данные	Управление
Потери давления, Па: 25815	Заполнить	Потери давления, Па: 19911	Заполнить
Расход воздуха, м³/ч: 241	Сброс	Расход воздуха, м³/ч: 370	Сброс
Тип насоса: <input checked="" type="checkbox"/> Роторный <input type="checkbox"/> Вихревой	Выход	Тип насоса: <input checked="" type="checkbox"/> Роторный <input type="checkbox"/> Вихревой	Выход
Результат Требуемая мощность насоса, кВт: 30		Результат Требуемая мощность насоса, кВт: 75	

Рис. 5.12. Выбор мощности насоса

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

5.3. Выводы

1. На основании численного эксперимента разработана программа для ЭВМ для расчета диаметров воздухопроводов 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. Компьютерные программы для расчета диаметров воздухопроводов и подбора оборудования могут быть использованы при проектировании систем вакуумной уборки.

Заключение

Проблема обеспечения нормируемых параметров воздуха на предприятиях по производству строительных материалов является, несомненно, весьма важной и актуальной. В первую очередь она связана с локализацией пылевывделений. Для этой цели используются аспирационные системы и вакуумные системы пылеуборки.

Выполненные авторами исследования показывают, что эта проблема может быть решена только на основе анализа физической природы процессов аэродинамики и тепло- и массообмена с использованием современных численных методов.

На основе данных лабораторных экспериментов выявлены качественные и количественные характеристики процессов взаимодействия частиц пыли и воздуха, на основе обобщения результатов исследований получены универсальные критериальные зависимости вида $Re_k = f(Ar, \mu)$ и $Fr_k = f(Re_{\text{вит}}, \alpha)$, позволяющие решать широкий круг задач в области аспирации и пневмотранспорта.

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. На основе данных численного эксперимента 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. Наличие данных лабораторного эксперимента подтвердило адекватность результатов численного моделирования.

Полученные в процессе численного моделирования аэродинамики и тепло- и массообмена при смешивании пылевоздушных и газовых потоков пространственные поля параметров подтвердили целесообразность применения предложенного инженерного решения для повышения эффективности очистки аспирационного воздуха.

Результатом выполненных исследований является совершенствование и развитие методов расчета вентиляции предприятий по производству строительных материалов.

Библиографический список

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. *Аверьянов В. К.* Повышение эффективности расчета систем вакуумной уборки для снижения выбросов в атмосферу / В. К. Аверьянов, А. Ю. Мартыанова, И. И. Суханова // Вода и экология: проблемы и решения. – 2018. – № 4. – С. 34–41.
4. *Азаров В. Н.* Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01. 03.00.16 / В. Н. Азаров. – Ростов-н/Дону, 2004. – 46 с.
5. *Алиев Г. М.-А.* Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Г. М.-А. Алиев. – М.: Metallurgy, 1986. – 544 с.
6. *Аметистов Е. В.* Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент / Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев, Б. Т. Емцев [и др.]. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 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 / А. Н. Богданов. – Казань, 2009. – 16 с.
10. *Большаков В. П.* Основы 3D-моделирования. Изучаем работу в AutoCAD, КОМПАС-3D, Solid Works, Inventor / В. П. Большаков, А. Л. Бочков. – СПб.: Питер-Пресс, 2012. – 304 с.
11. *Бочков А. Л.* Трехмерное моделирование в системе Компас-3D (практическое руководство) / А. Л. Бочков. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 80 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 [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1969.
16. *Воронин Ю. Б.* Пневмотранспорт измельченной древесины / Ю. Б. Воронин. – М.: Лесная промышленность, 1977. – 208 с.
17. *Воскресенский В. Е.* Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообрабатывающих предприятиях. Теория и практика: учеб. пособие: в 2 т. / В. Е. Воскресенский. – СПб.: Политехника, 2008. – Т. 1. Аспирация и транспортные пневмосистемы. – 430 с.
18. *Ганин Н. Б.* Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D / Н. Б. Ганин. – М.: ДМК-Пресс, 2012. – 784 с.
19. ГН 2.2.5.1313–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны: гигиенические нормативы. – М.: СТК Аякс, 2003. – 268 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, 1986. – 688 с.
23. ГОСТ 12.3.018–79. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. – М.: Госстандарт, 1980. – С. 132–142.
24. *Грачев Ю. Г.* Очистка воздуха зданий от вредных веществ: учеб. пособие / Ю. Г. Грачев. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 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. *Гринева К. М.* Пневматический транспорт в цементной промышленности / К. М. Гринева, М. Н. Крашенинников, А. П. Кротков. – М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1951. – 139 с.
27. *Губин Е. И.* К вопросу моделирования процесса смешивания запыленных потоков / Е. И. Губин // Матер. XXX Международной науч.-технич. конф. молодых ученых, аспирантов и докторантов «Актуальные проблемы науки XXI века». – М.: «Cognitio», 2018. – С. 35–40.
28. *Дацюк Т. А.* Моделирование рассеивания вентиляционных выбросов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Т. А. Дацюк. – СПб, СПбГАСУ, 2000. – 296 с.
29. *Дацюк Т. А.* Совершенствование принципов расчета систем обеспечения микроклимата зданий / Т. А. Дацюк, В. В. Дерюгин, Ю. Н. Леонтьева // Известия 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 / 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 общ. ред. С. А. Евтюкова. – СПб.: Петрополис, 2012 г. – 306 с.
36. Евтюков С. А. Справочник по пневмокомплексам и пневмотранспортному оборудованию / С. А. Евтюков, М. М. Шапунов; под общ. ред. М. М. Шапунова. – СПб.: 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. – 1959. – Т. 2. – № 2. – 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 / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – 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, 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. М. П. Калинушкина. – Л.: Машиностроение, 1986. – 286 с.
46. *Калинушкин М. П.* Вентиляторные установки / М. П. Калинушкин. – М.: Высш. шк., 1967. – 259 с.
47. *Кафаров В. В.* Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М.: Высш. шк., 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 / П. А. Коузов, А. Д. Мальгин, Г. М. Скрябин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Химия, 1993. – 320 с.
51. *Кузнецов Ю. М.* Пневмотранспорт: теория и практика / Ю. М. Кузнецов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 61 с.
52. *Куничан Г. И.* Построение объемных моделей в системе КОМПАС-3D / Г. И. Куничан, Т. Н. Смирнова, Л. И. Идт. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2016. – 65 с.
53. *Курников А. А.* Пневматическая пылеуборка цехов машиностроительных заводов. / А. А. Курников, В. А. Курников. – М.: Машиностроение, 1983. – 152 с.
54. Лабораторный практикум по теплогазоснабжению и вентиляции / под ред. Э. Х. Одельского, О. А. Мухина. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск: Высш. шк., 1973. – 208 с.
55. *Ладыгичев М. Г.* Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: справочное издание / М. Г. Ладыгичев, Г. Я. Бернер – М.: Теплотехник, 2004. – 696 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 / Е. Н. Львовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.
61. Малевич И. П. Пневматический транспорт сыпучих строительных материалов. / И. П. Малевич, А. И. Матвеев. – М.: Стройиздат, 1979. – 143 с.
62. Мамошин А. Е. Классификация, псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов / А. Е. Мамошин. – Екатеринбург: АМБ, 2004. – 126 с.
63. Марон В. И. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах / В. И. Марон. – М.: Лань, 2012. – 256 с.
64. Мартянова А. Ю. Совершенствование методов расчета вакуумных систем на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / А. Ю. Мартянова. – СПб, 2017. – 154 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. Мартянова А. Ю. Влияние массовой и объемной концентрации на скорость витания твердых частиц / А. Ю. Мартянова // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2 (55). – С. 143–147.
69. Мартянова А. Ю. Развитие численных методов расчета систем вакуумной уборки / А. Ю. Мартянова, А. Н. Колосницын // 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. по строительству и архитектуре УССР, 1962. – 103 с.
71. Миккульский В. Г. Строительные материалы. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебник / В. Г. Миккульский [и др.]; ред. В. Г. Миккульский. – 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: сб. 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 / В. А. Минко // Сб. тр. междунар. науч.-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 / М. В. 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. ОНТП 10-85. ОНТП-10-85. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий по производству извести. – М., 1986. – 38 с.
83. Барилевич В. А. Основы термогазодинамики двухфазных потоков и их численное решение: учеб. пособие / В. А. Барилевич. – СПб.: Изд. Политехнического университета, 2009. – 425 с.
84. Патент на полезную модель № 97168. Аспирационное укрытие мест перегрузки сыпучего материала. Авторы: Гольцов А. Б., Минко В. А., Логачев И. Н., Феоктистов А. Ю., Староверов С. В., Киреев В. М., Попов Е. Н., Семенов А. С. Опубл. 27.08.2010. – 5 с.
85. Патент на изобретение № 1654161 (А. с. СССР № 962127; Бюл. № 21, 07.06.91). Аспирационное устройство узла загрузки ленточного транспортера. Авторы патента: Какабадзе К. В., Ломидзе Л. Р., Нижаарадзе А. И., Рехвиашвили О. В., Чилашвили Ш. Е. – 2 с.
86. Патент на изобретение № 1184774 (А. с. СССР № 850538; Бюл. № 38, 15.10.85). Устройство для загрузки материалов в емкости. Авторы: Качанов В. В., Логачев И. Н., Гольшев А. М., Коренной Л. Д., Белик Т. Г., Фаермарк А. А., Костюк В. К. – 2 с.

87. Патент на изобретение № 854087. Аспирационное укрытие пункта перегрузки сыпучих материалов. Авторы: Афанасьев И. И., Пирогов Ю. И., Маринченко В. М., Коренной Л. Д., Николина Г. Н. – 3 с.
88. Патент на изобретение № 1183433 (А. с. СССР № 940872; Бюл. № 37, 07.10.85). Укрытие места загрузки ленточного конвейера Двуреченский И. С., Скомаровский С. Д., Панченко В. Ф., Карельштейн Б. Л., Зинякин Е. М., Белкин В. А., Филатов А. Н.
89. *Пирумов А. И.* Обеспыливание воздуха / А. И. Пирумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
90. *Платонов В. С.* Пути повышения эффективности производства цемента / В. С. Платонов, Е. А. Малооков. – СПб.: СЗПИ, 2000. – 74 с.
91. *Полонский В. М.* Охрана воздушного бассейна заводов строительной индустрии: учеб. пособие / В. М. Полонский. – Самара, 2066. – 200 с.
92. *Полушкин В. И.* Очистка воздуха от пыли: учеб. пособие / В. И. Полушкин, Н. Ф. Разумов, Л. Е. Шувалова – СПб.: СПбГАСУ, 1996. – 100 с.
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: учебник / В. В. Поляков, Л. С. Скворцов. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.
95. *Попов Л. Н.* Строительные материалы, изделия и конструкции: учеб. пособие / Л. Н. Попов. – М.: ОАО «ЦПП», 2010. – 467 с.
96. Проектирование промышленной вентиляции: справочник / Б. М. Торговников, В. Е. Табачник, Е. М. Ефанов. – Киев: Будівник, 1983. – 256 с.
97. *Разумов И. М.* Пневно- и гидротранспорт в химической промышленности. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / И. М. Разумов. – М.: Химия, 1979. – 248 с.
98. Рекомендации по расчету объемов аспирируемого воздуха от укрытий перегрузок при транспортировании пылящих материалов, АЗ-611. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1973. – 31 с.
99. *Рыбьев И. А.* Строительное материаловедение: учеб. пособие / И. А. Рыбьев. – М.: Высш. шк., 2002. – 701 с.
100. *Святков С. Н.* Пневматический транспорт измельченной древесины / С. Н. Святков. – М.: Лесная промышленность, 1966. – 320 с.
101. *Смирнова Е. Э.* Многокомпонентные цементы с использованием попутных продуктов цветной и черной металлургии: дис. ... канд. техн. наук / Е. Э. Смирнова. – СПб., СПбГИ(ТУ), 1996. – 160 с.
102. *Солопов С. Г.* Вопросы пневмотранспорта фрезерного торфа в горизонтальных трубах / С. Г. Солопов, Л. О. Горцакалян // Торфяная промышленность. – 1961. – № 6. – С. 6–11.

103. Сотников А. Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха: в 2 т. / А. Г. Сотников // Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС. – СПб.: Проектоптимум, 2013. – Т. 1. – 423 с.
104. Сотников А. Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха: в 2 т. / А. Г. Сотников // Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС. – СПб.: Проектоптимум, 2013. – Т. 2. – 430 с.
105. Сотников А. Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции: в 2 т. / А. Г. Сотников. – СПб.: ООО «АТ», 2006. – Т. II. – Ч. 1. – 416 с.
106. Сотников А. Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции: в 2 т. / А. Г. Сотников. – СПб.: ООО «АТ», 2007. – Том II. – Ч. 2. – 512 с.
107. СП 50.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003. Тепловая защита зданий. – М.: Минрегион России, 2013. – 95 с.
108. Спиваковский А. О. Конвейерные установки. / А. О. Спиваковский. – Киев: Государственное научно-техническое издательство Украины, 1935. – Часть IV. ОНТИ НКТП. – 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: матер. 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. Патент на изобретение № 2110735. Система вентиляции цеха с пылевыделениями. Авторы: Уляшева В. М., Дубенков С. В., Басова Ю. А., Сорокин Н. А. Опубл. 10.05.98. – 4 с.
114. Уляшева В. М. Повышение эффективности способов очистки вентиляционных выбросов на предприятиях строительной индустрии / В. М. Уляшева, А. М. Гримитлин, Н. А. Черников // Вода и экология: проблемы и решения. – 2018. – № 4. – С. 92–98.

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.: АН 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.: АН СССР, 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 промышленность, 1983. – 160 с.
122. Шумилов Р. Н. Теоретические основы вентиляции. Тепло- и массообмен / Р. Н. Шумилов. – Екатеринбург.: УГТУ, 1995. – 1995. – 68 с.
123. Boysan F. A. Fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design. / F. Boysan, W.H. Ayers, J. Swithenbank // Chemical Engineering Research and Design. – 1982. – P. 222–230.
124. Di Renzo A. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes / 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. – P. 487–508.
126. Gosman A. D. Aspects of computer simulation of liquid- fueled combustors / A. D. Gosman, E. Ioannides // Journal of Energy. – 1983. – Vol.7(6). – P. 482–490.
127. 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.
128. 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
129. Johnson K. L. Contact Mechanics. Cambridge / K. L. Johnson // Cambridge University Press. – 1987. – 452 P.
130. Hoekstra A. J. An Experimental and Numerical Study of Turbulent Swirling Flow in Gas Cyclones / A. J. Hoekstra, J. J. Derksen, H. E. A. Van Den Akker // Chemical Engineering Science. – 1999. – Vol. 54. – pp. 2055–2065. Доступно по [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00373-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00373-X) (дата обращения: 15.01.2018).

131. *Launder B.* Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc Letters / B. Launder, B. Sharma // Heat Mass Transfer. – 1974. – Vol. 1. – P. 131–138.
132. *Pandelidis D.* Application of a statistifl design for analyzing basic performance characteristics of the cross-flow Maisotsenko cycle heat exchanger / D. Pandelidis, S. Anisimov // Heat and Mass Nransfer. – 2016. – Vol. 95. – P. 45–61.
133. *Pant K.* On the design of miniature cyclone for the collection of bioaerosols / K. Pant, C. T. Crowe, P. Irving // Powder Technology. – 2002. – Vol. 125. – P. 260–265.
134. *Stüben K.* Multigrid methods: Fundamental algorithms, model problem analysis and applications / K. Stüben, U. Trottenberg // Lecture Notes in Mathematics. – Springer, 1996. – P. 1–176.
135. *Goodfellow H.* Industrial Ventilation. Design Guidebook / H. Goodfellow, E. Tahti. – San-Diego et al.: Academic Press, 2001. – 1519 p.
136. Scott Neidigh Introduction to the Theoretical and Practical Principles of Pneumatic Conveying. [Electronic resource] / Scott Neidigh. – Mode of access: <http://neuero.de/wp-content/uploads/2014/03/PT12-Teorie-in-Pneumatic-Conveying.pdf>
137. *Sommerfeld M.* Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows / M. Sommerfeld, C. H. Ho // Powder Tech. – 2003. – Vol. 131. – P.1–6.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица А.1

Результаты исследования влияния размера на скорость витания твердой частицы

№ эксперимента	Размер частицы d , мм	Плотность частицы ρ , кг/м ³	Диаметр трубопровода D , мм	Показания микроманометра l , мм	Угол наклона шкалы, $k_{\text{н}}$	Статическое давление $P_{\text{ст}}$, Па	Расход воздуха Q , м ³ /ч	Скорость витания эксперимент, $w_{\text{внт}}$ м/с	Скорость витания среднее, $w_{\text{ст}}$ м/с	Скорость витания расчетная, $w_{\text{рр}}$ м/с [27]
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 табл. А.1 представлена в табл. А.3.

Таблица А.2

Результаты исследования влияния плотности на скорость витания твердой частицы

№ эксперимента	Размер частицы d , мм	Плотность частицы ρ , кг/м ³	Диаметр трубопровода D , мм	Показания микроманометра l , мм	Угол наклона шкалы, k_n	Статическое давление $P_{ст}$, Па	Расход воздуха Q , м ³ /ч	Скорость витания, эксперимент, w_p , м/с	Скорость витания, среднее, $w_{ср}$, м/с	Скорость витания, расчетная, $w_{р\text{с}}$, м/с [27]
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 табл. А.2 представлена в табл. А.4.

**Обработка результатов экспериментов
по данным табл. А.1**

№ эксперимента	Размер частицы d , мм	$(w_{\text{виг}} - \bar{w}_{\text{виг}})^2$	S_i^2	$G_{\text{оп}}$	S_e^2	$(\bar{w}_{\text{виг}} - \hat{w}_{\text{рч}})^2$	S_{le}^2
1	15	0,0053	0,0042			0,00058	
2		0,0005					
3		0,0026					
1	10	0,0277	0,2197				
2		0,1317					
3		0,2801					
1	7,5	0,4783	0,3588				
2		0,1159					
3		0,1233					
1	5	0,2947	0,2339				
2		0,0251					
3		0,14792					
1	2,5	0,2880	0,5859				
2		0,1155					
3		0,7683					
			1,4025	0,4178	0,2805	0,5803	0,8705

Таблица А.4

Обработка результатов экспериментов по данным табл. А.2

№ эксперимента	Плотность частицы ρ , кг/м ³	$(x - \bar{x})^2$	S_i^2	$G_{оп}$	S_e^2	$(\bar{y} - \hat{y})^2$	S_{te}^2
1	2300	1,6058	1,2584			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		0,1479 ^б					
			2,9355	0,4287	0,5871	0,8331	1,2496

Таблица А.5

Результаты экспериментальных исследований опытной установки

№ эксперимента	Размер частицы d , мм	Плотность частицы ρ , кг/м ³	Концентрация частиц μ , кг/кг	Диаметр трубопровода D , мм	Показания микроманометра I , мм	Угол наклона шкалы, $k_{\text{н}}$	Статическое давление $P_{\text{ст}}$, Па	Расход воздуха Q , м ³ /ч	Скорость витания эксперимент, $w_{\text{внт}}$, м/с	Скорость витания расчетная, $w_{\text{рч}}$, 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

Окончание табл. А.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
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

ρ, кг/м ³	d, мм	μ, кг/кг									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
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

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
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	5,59	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

Приложения

Продолжение табл. А.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
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

Приложение А

Окончание табл. А.6

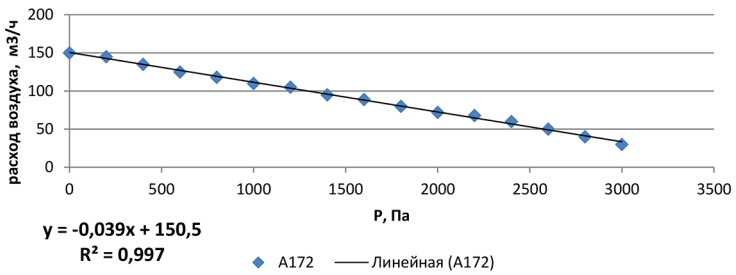
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
900	5	9,94	9,89	9,84	9,79	9,73	9,68	9,63	9,58	9,53	9,48
900	6	10,85	10,75	10,66	10,56	10,46	10,37	10,27	10,17	10,08	9,98
900	7	11,76	11,62	11,48	11,33	11,19	11,05	10,91	10,77	10,62	10,48
900	8	12,67	12,48	12,30	12,11	11,92	11,73	11,55	11,36	11,17	10,98
900	9	13,58	13,35	13,12	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

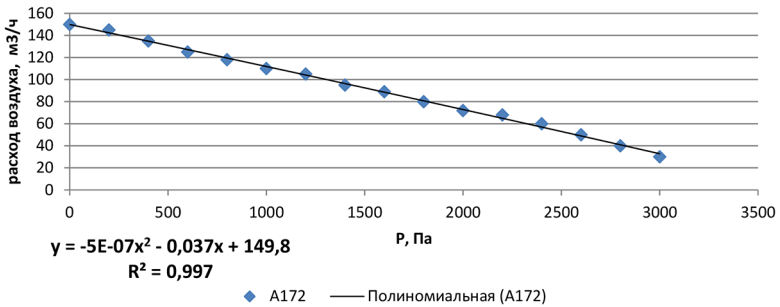
а)

A172



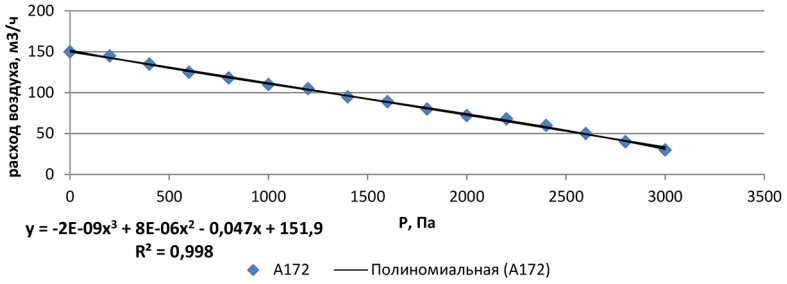
б)

A172



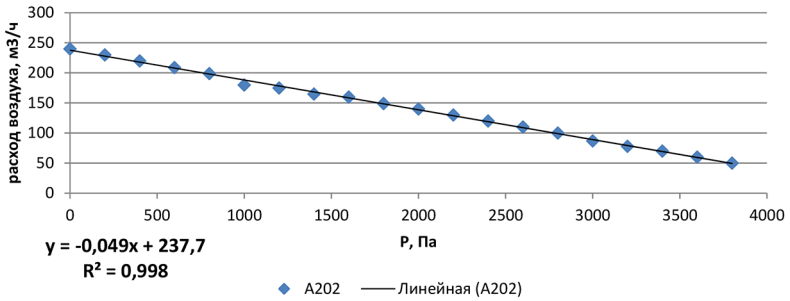
в)

A172



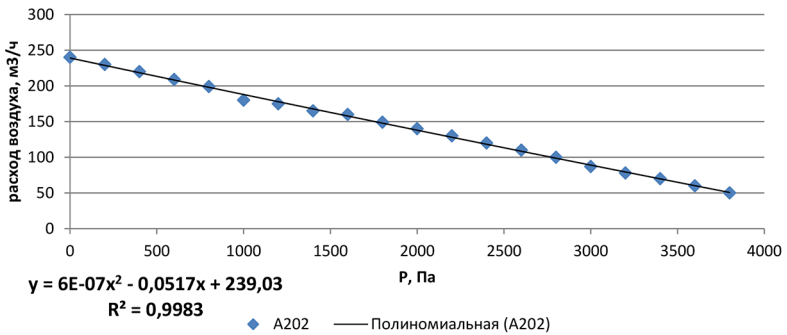
а)

A202



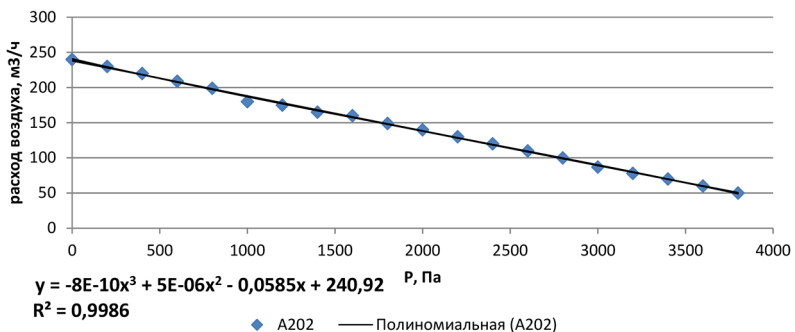
б)

A202



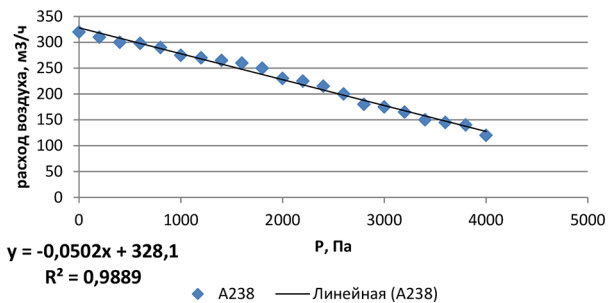
в)

A202



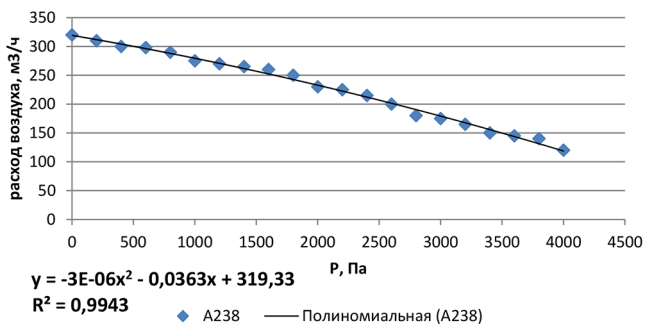
а)

A238

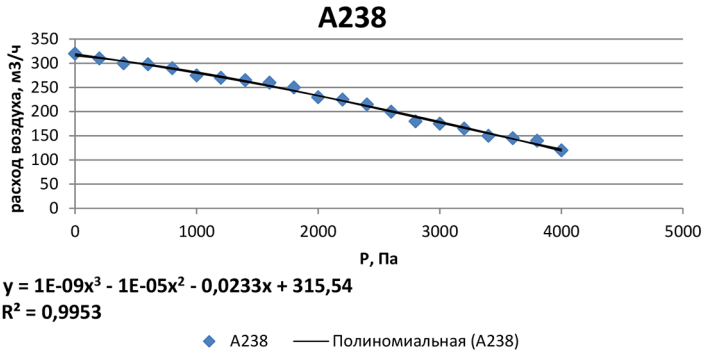


б)

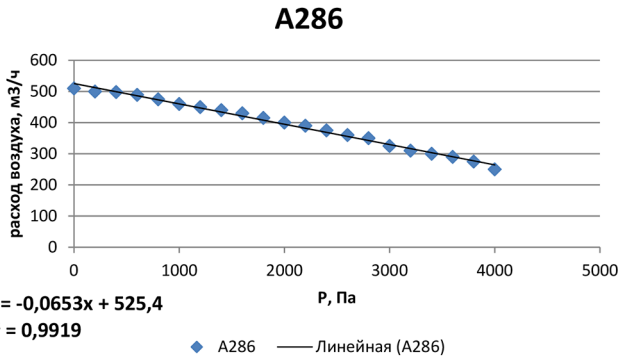
A238



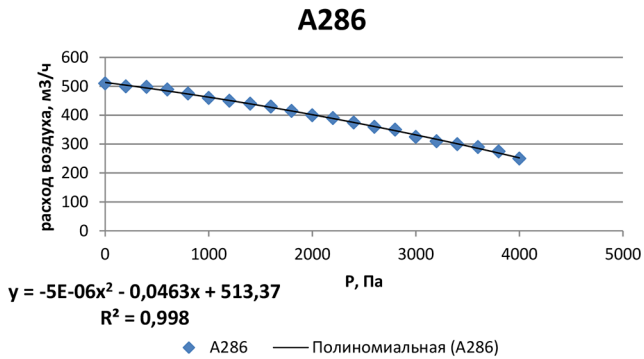
в)



а)

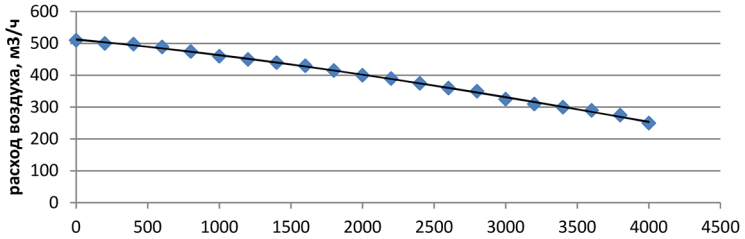


б)



в)

A286



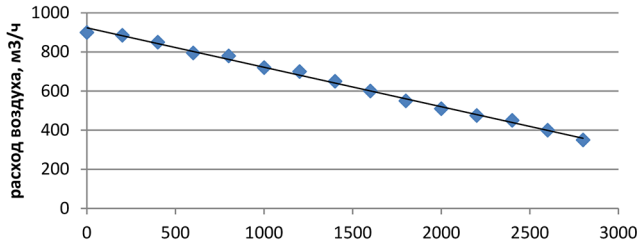
$$y = 9E-10x^3 - 1E-05x^2 - 0,0378x + 510,88$$

$$R^2 = 0,9983$$

◆ A286 — Полиномиальная (A286)

а)

A322



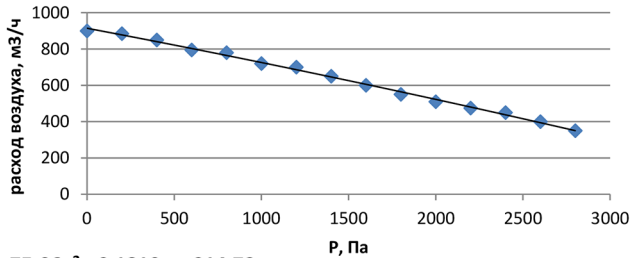
$$y = -0,2016x + 923,25$$

$$R^2 = 0,996$$

◆ A322 — Линейная (A322)

б)

A322



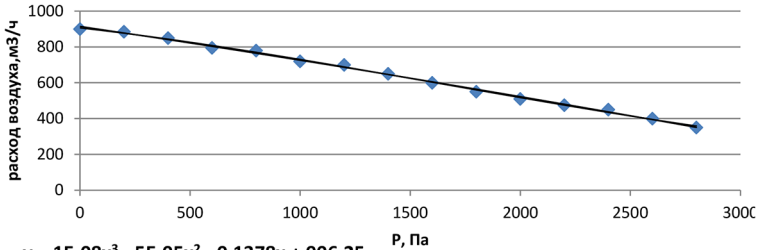
$$y = -7E-06x^2 - 0,1819x + 914,72$$

$$R^2 = 0,9967$$

◆ A322 — Полиномиальная (A322)

в)

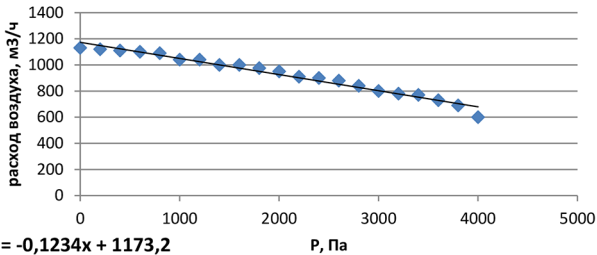
A322



$y = 1E-08x^3 - 5E-05x^2 - 0,1378x + 906,25$
 $R^2 = 0,9975$
 ◆ A322 — Полиномиальная (A322)

а)

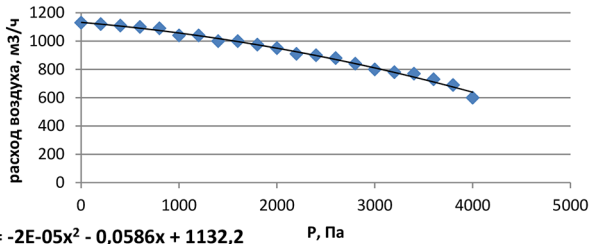
A344



$y = -0,1234x + 1173,2$
 $R^2 = 0,9721$
 ◆ A344 — Линейная (A344)

б)

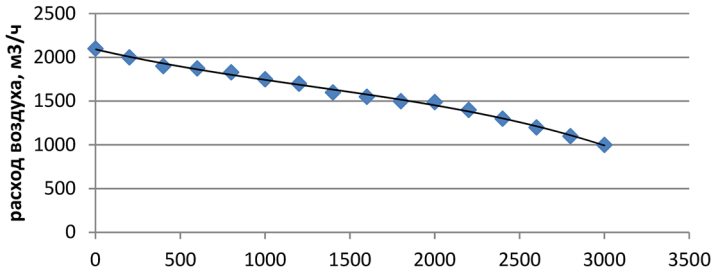
A344



$y = -2E-05x^2 - 0,0586x + 1132,2$
 $R^2 = 0,9916$
 ◆ A344 — Полиномиальная (A344)

в)

A384



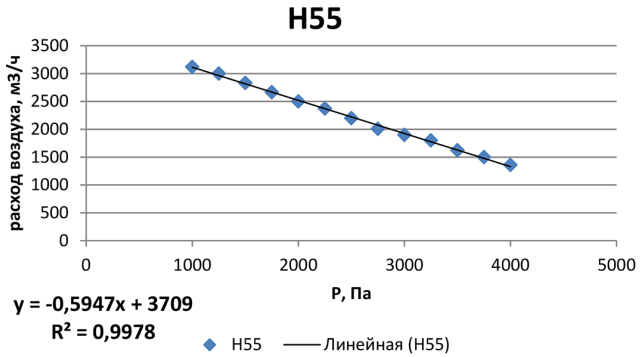
$$y = -4E-08x^3 + 0,0001x^2 - 0,4536x + 2091,4 \quad P, \text{Па}$$

$$R^2 = 0,996$$

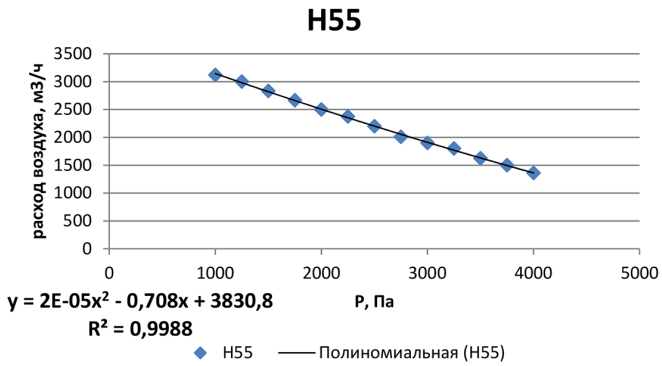
◆ A384 — Полиномиальная (A384)

Роторные насосы

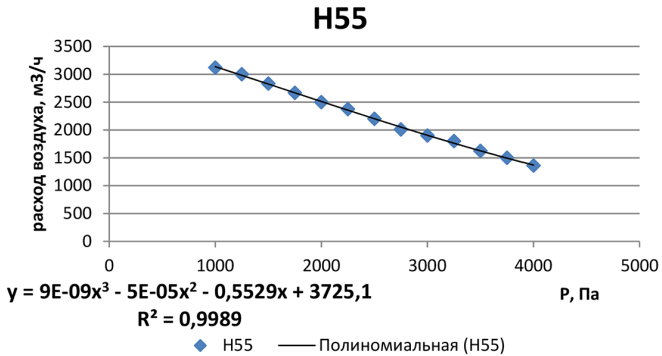
а)



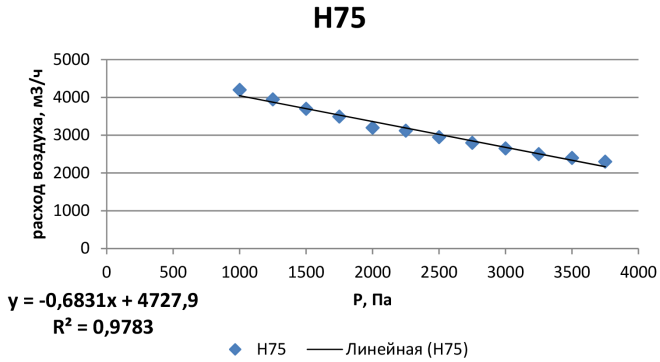
б)



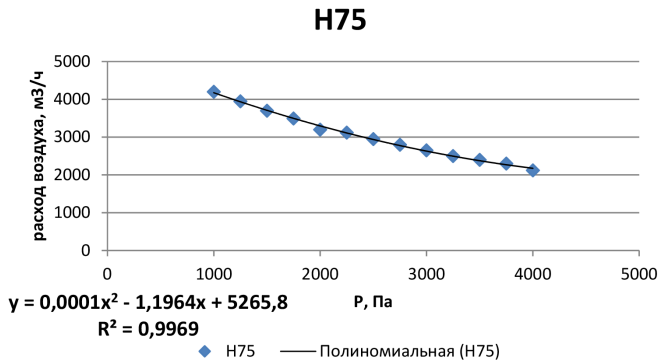
в)



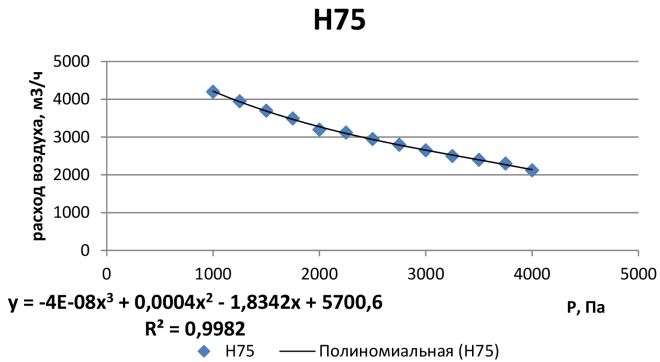
а)



б)

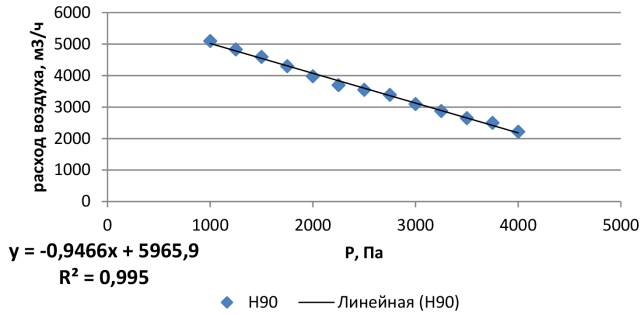


в)



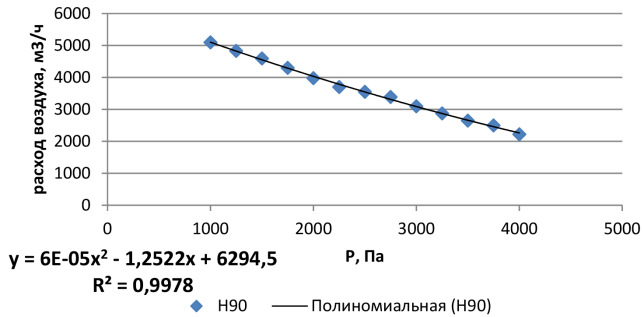
а)

Н90



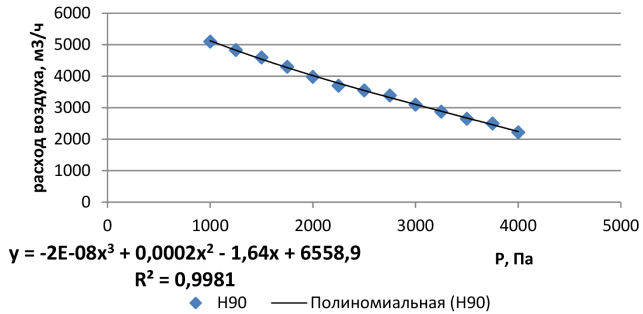
б)

Н90



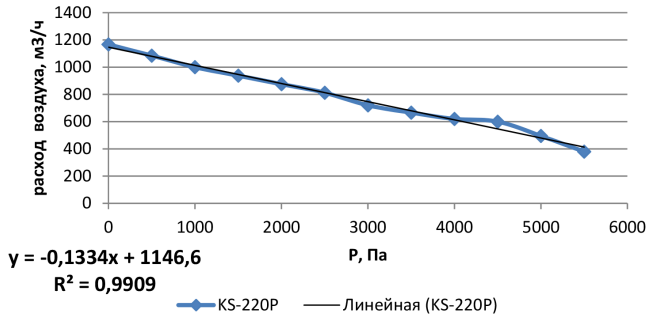
в)

Н90



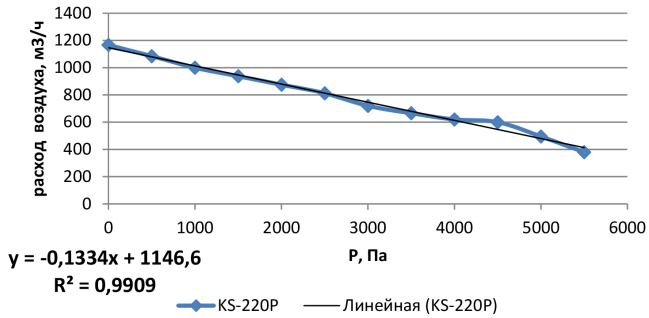
а)

KS-220P



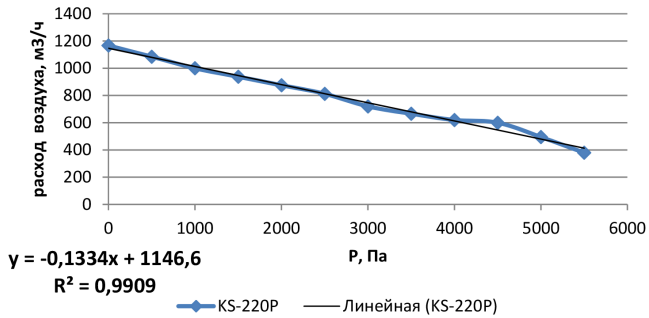
б)

KS-220P



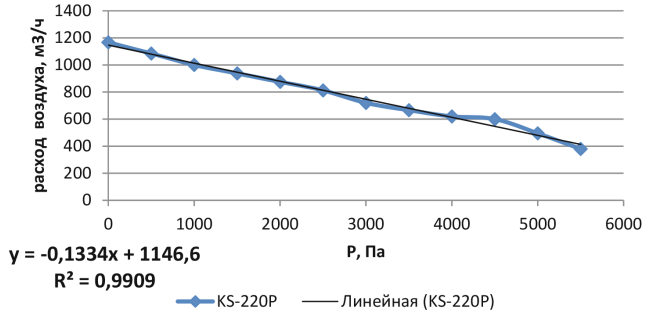
в)

KS-220P



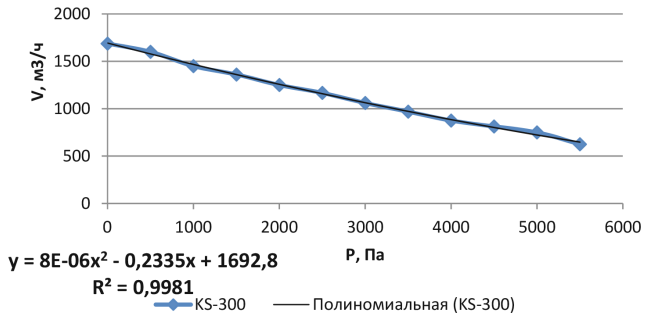
а)

KS-220P



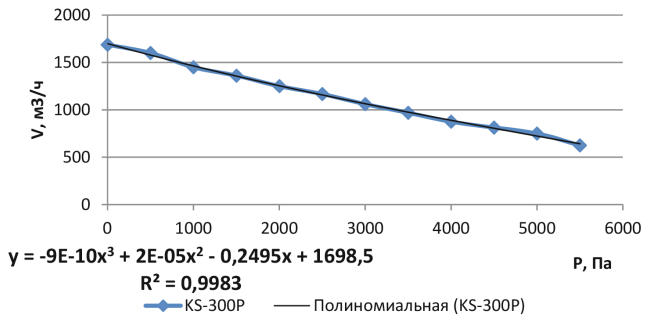
б)

KS-300



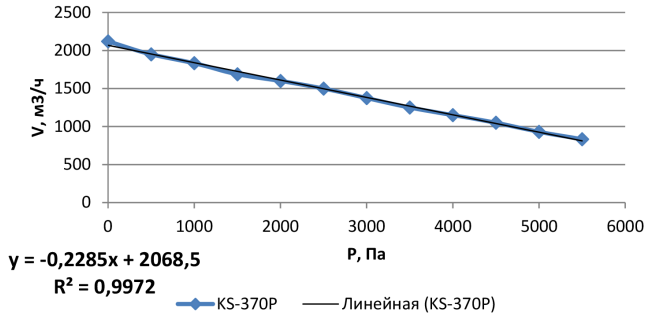
в)

KS-300P



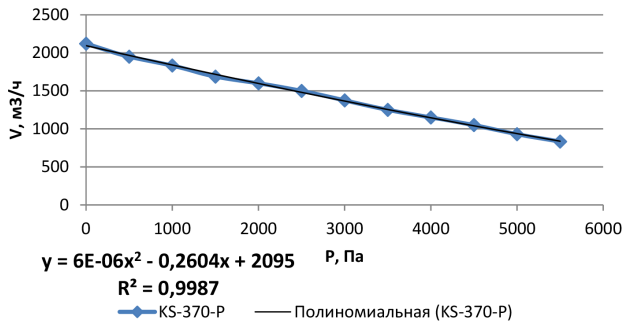
а)

KS-370P



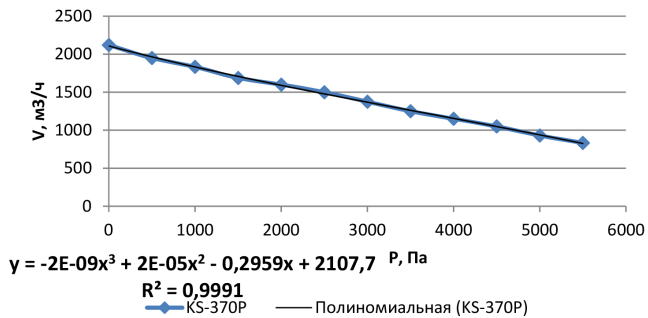
б)

KS-370-P



в)

KS-370P



Результаты расчетов по программе для ЭВМ РФ № 2015619490

P, Па	Расходы воздуха V, м³/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

Таблица Б.2

Р, Па	Расходы воздуха V , м ³ /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 ³ /ч							
	А238				А 286			
	[133]	по линей- ной зави- симости	по поли- ному 2-й ст.	по поли- ному 3-й ст.	[133]	по линей- ной зави- симости	по поли- ному 2-й ст.	по поли- ному 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

Таблица Б.3

P, Па	Расходы воздуха V, м³/ч							
	А 322				А 344			
	[133]	по линей- ной зави- симости	по поли- ному 2-й ст.	по поли- ному 3-й ст.	[133]	по линей- ной зави- симости	по поли- ному 2-й ст.	по поли- ному 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

Таблица Б.4

Р, Па	Расходы воздуха V, м³/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

Таблица Б.5

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

Таблица Б.6

Р, Па		Расходы воздуха V, м³/ч											
		КС-220Р				КС-300Р				КС-370Р			
		[133]	по линейной за- висимости	по поли- ному 2-й	по поли- ному 3-й	[133]	по линейной за- висимости	по поли- ному 2-й	по поли- ному 3-й	[133]	по линейной за- висимости	по поли- ному 2-й	по поли- ному 3-й
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	

Оглавление

Условные обозначения	3
Индексы	3
Критерии подобия	4
Введение	5
Глава 1. Анализ особенностей технологических процессов и функционирования систем вентиляции цехов по производству строительных материалов	8
1.1. Общая характеристика объектов исследований	8
1.2. Современное состояние воздушной среды цехов по производству строительных материалов	27
1.3. Системы удаления пыли при производстве строительных материалов (извести, цемента и сухих строительных смесей)	39
1.4. Методы расчета вентиляции в помещениях с пылевыделениями	57
1.4.1. Скорости витания, трогания, транспортирования в аспирационных системах	59
1.4.2. Концентрация аэросмеси	74
1.4.3. Характер движения частиц материала в вертикальных и горизонтальных воздуховодах	76
1.4.4. Характер движения частиц материала в наклонных воздуховодах	79
1.5. Выводы	82
Глава 2. Экспериментальные исследования скорости витания твердых частиц	84
2.1. Экспериментальная установка для определения скорости витания твердых частиц	85
2.2. Методика проведения экспериментов	92
2.3. Проведение полного трехфакторного эксперимента	99
2.4. Обработка экспериментальных данных	101

- 2.5. Экспериментальные исследования движения пылевоздушного потока в наклонном воздуховоде 115
- 2.6. Выводы 122

Глава 3. Численное моделирование движения частиц в воздуховоде 124

- 3.1. Построение модели обтекания твердых частиц потоком воздуха 125
- 3.2. Численное моделирование скорости витания 135
- 3.3. Моделирование теплообмена в воздуховодах аспирационных систем 148
- 3.4. Выводы 155

Глава 4. Расчет вакуумных систем обеспыливания на предприятиях по производству сухих строительных смесей и цемента 157

- 4.1. Устройство и типы систем всасывающего пневмотранспорта 157
- 4.2. Пылеуборочный инструмент. 166
 - 4.2.1. Пылесосные насадки 167
 - 4.2.2. Рукоятки 179
 - 4.2.3. Пылесосные шланги 182
- 4.3. Трубопроводы. 185
 - 4.3.1. Конструирование системы трубопроводов 185
 - 4.3.2. Потери давления в отводах 192
- 4.4. Выводы 197

Глава 5. Расчет вакуумных систем обеспыливания на предприятиях по производству сухих строительных смесей и цемента 199

- 5.1. Программа расчета воздухопроводов при проектировании вакуумной системы обеспыливания 199
- 5.2. Программа подбора мощности вакуумного насоса при проектировании систем аспирации и пневмотранспорта 208

Оглавление

5.3. Выводы	214
Заключение	215
Библиографический список	217
Приложения	227
Приложение А	227
Приложение Б	236

Научное издание

Васильев Владимир Филиппович
Мартьянова Анна Юрьевна
Суханова Инна Ивановна
Уляшева Вера Михайловна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ВЕНТИЛЯЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Монография

Редактор *Т. В. Середова*
Компьютерная верстка *О. Н. Комиссаровой*

Подписано к печати 12.12.2019. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бум. офсетная.
Усл. печ. л. 15,11. Тираж 500 экз. Заказ 185. «С» 108.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.
Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

ДЛЯ ЗАПИСЕЙ