

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

На правах рукописи



Семиненко Артем Сергеевич

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, доцент
Аверкова Ольга Александровна

Белгород - 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЫЛЕВЫДЕЛЕНИЙ ПРИ ЗАГРУЗКЕ БУНКЕРОВ.....	12
1.1. Технологические и компоновочные решения складов порошковых материалов	12
1.1.1. Бункера порошкообразных материалов, как источник пылевого загрязнения	12
1.1.2. Обзор научных исследований в области пылеобразования при перегрузках сыпучих материалов.....	16
1.2. Технические решения и методика расчета систем обеспыливающей вентиляции бункеров	20
1.2.1. Конструктивное оформление систем аспирации бункеров.....	20
1.2.2. Конструктивное оформление узлов загрузки бункеров.....	26
1.2.4. Методика расчета систем обеспыливающей вентиляции.....	31
1.3. Анализ закономерностей изменения направления воздушных струй, движущихся вдоль криволинейной поверхности	35
1.4. Выводы к главе 1	43
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В БУНКЕРАХ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ ЗАГРУЗКЕ.....	44
2.1. Основные уравнения динамики частиц	44
2.1.1. Силы, действующие на частицу	44
2.1.2. Уравнения динамики	46
2.1.3. Определение начальных условий.....	49
2.2. Поле скоростей воздуха при различном конструктивном исполнении загрузочных патрубков	51
2.2.1. Осесимметричная свободная струя.....	51
2.2.2. Плоская струя	56
2.2.3. Веерная слабозакрученная струя.....	59

2.3. Траектории частиц в полости бункера при различных схемах пневмозагрузки.....	66
2.4. Результаты исследований пылеаэродинамики бункеров при различных способах загрузки	69
2.5. Выводы к главе 2.....	73
3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА	74
3.1. Разработка принципиальной схемы узла загрузки бункеров, обеспечивающего снижение пылеобразования	74
3.2. План, программа и методика проведения экспериментальных исследований	79
3.2.1. Цели и задачи экспериментальных исследований	79
3.2.2. Планирование эксперимента	80
3.2.3. Описание экспериментальной установки.....	82
3.2.4. Методика проведения экспериментальных исследований.....	85
3.3. Результаты экспериментальных исследований условий реализации эффекта Коанда на разрабатываемом устройстве.....	86
3.4. Рациональные конструктивно-режимные параметры устройства.....	91
3.5. Выводы к главе 3.....	95
4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	97
4.1. Рекомендуемые схемы систем вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов.....	97
4.1.1. Техническое описание предлагаемых систем вентиляции.....	97
4.1.2. Методика расчета предлагаемых систем вентиляции.....	102
4.2. Обеспыливание цементных силосов ЗАО «Белгородский цемент»	106
4.2.1. Характеристика условий производства	106
4.2.2. Описание предлагаемого решения и результата	108
4.2.3. Расчет экономического эффекта от внедрения предлагаемых решений.....	110
4.3. Обеспыливание бункеров цеха водосодержащих эмульсий	114

4.3.1 Характеристика условий производства	114
4.3.2 Описание предлагаемого решения и результатов	116
4.3.3 Расчет экономического эффекта.....	119
4.4. Выводы к главе 4.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЯ	138
Приложение А. Список основных условных обозначений	138
Приложение Б. Программа расчета проекций скорости осесимметричной струи.....	141
Приложение В. Программа расчета проекций скорости плоской струи.....	152
Приложение Г. Программа расчета проекций скорости веерной струи	163
Приложение Д. Программа расчета траекторий полета пылевой частицы при формировании веерной струи в узле загрузки бункера.....	174
Приложение Е. Описание полезной модели к патенту RU 48318.....	177
Приложение Ж. Извещение к патенту на полезную модель RU 48318.....	178
Приложение З. Описание полезной модели к патенту RU 161397	179
Приложение И. Извещение к патенту на полезную модель RU 142259	180
Приложение К. Описание полезной модели к патенту RU 177236	182
Приложение Л. Копии документов о внедрении результатов диссертационного исследования	189

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В процессе перегрузок порошкообразных материалов (цемент; полевой шпат; металлическая пыль; известь; шлак; доломит; кальцит; зола; литейный песок и т.п.) возникают пылевые выбросы, наносящие значительный вред окружающей среде и человеку. С целью минимизации пылевых выбросов в атмосферу используют системы пневматического транспортирования, бункера для хранения материала и системы вентиляции для улавливания пылевых частиц. При пневмотранспортировании материал изолирован от рабочей среды, тем самым обеспечивается беспыльность транспортировки. Загрузка должна производиться в герметичные емкости, оснащенные системой обеспыливающей вентиляции. При этом нагрузка на систему обеспыливания увеличивается вследствие высокой скорости транспортирования потока сыпучего материала по сравнению, с другими способами транспортировки. Снижению нагрузки и повышению эффективности системы обеспыливающей вентиляции способствует снижение концентрации материала в аспирационном воздухе. Этого можно достичь путем организации воздушных потоков в полости бункера за счет модернизации узла загрузки. В настоящее время не уделяется должного внимания конструированию загрузочных узлов бункеров, которые с высокой степенью эффективности могут выполнять дополнительные функции, в том числе, сепарационную и обеспыливающую. В частности, снижение скорости запылённого воздушного потока в загрузочном узле может привести к значительному повышению эффективности системы обеспыливающей вентиляции.

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

Данное диссертационное исследование выполнялось в рамках следующих научных проектов: грант РФФИ № 14-41-18005 р_офи_м «Математическое моделирование процессов аспирации и разработка научных основ создания энергоэффективных систем локализации пылегазовых выделений»; грант РФФИ № 16-

08-00074а «Моделирование закрученных потоков в системах аспирации», грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-588.2012.8 «Разработка методов пыле- и газопылеулавливания в пыльных цехах промышленных предприятий»; НИР «Разработка методик расчета систем обеспыливания и исследование условий загрузки бункеров с учетом дисперсности материалов» в рамках реализации мероприятий Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012-2016 годы; НИР «Разработка энергоэффективных систем аспирации цементных складов силосного типа» в рамках реализации Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2017-2021 годы.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической базой исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых – Азарова В.Н, Богуславского Е.И., Боровкова Д.П., Вальдберга А.Ю., Гримитлина А.М., Зиганшина М.Г., Коузова П.А., Красовицкого Ю.В., Ливчак И.Ф., Логачева И.Н., Нейкова О.Д., Минко В.А., Посохина В.Н., Сатарина В.И., Страус В., Штокмана Е.А., Anderson D.M., Nath T., Nemeon W.C.L., Jones M.G., Bianconi W.O.A., Wyruch P.W., Xiaochuan Li и др.

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

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

Цель работы – повышение эффективности системы вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов за счет

совершенствования конструкции узла загрузки бункеров.

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

- провести анализ существующих систем обеспыливания бункеров, условий пылеобразования при загрузке порошкообразных материалов, конструктивного оформления загрузочных узлов, методики подбора и расчета эффективности работы основных элементов систем вентиляции, а также направлений их совершенствования;

- получить аналитические выражения динамики свободных струйных течений для различных вариантов конструктивного исполнения загрузочных узлов бункера;

- разработать конструкцию узла загрузки бункера и экспериментально доказать работоспособность технического решения, обеспечивающего снижение пылеобразование при пневмотранспортной загрузке материала;

- разработать математическую модель воздушного течения в загрузочном узле бункера, установить степень ее достоверности и адекватности, определить эффективные режимы работы разрабатываемого устройства;

- получить регрессионные уравнения, позволяющие определить рациональные геометрические характеристики устройства, обеспечивающих создание необходимых условий загрузки;

- разработать схемы и методики расчета систем вентиляции бункеров при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов, обеспечивающих снижение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе;

- провести промышленные испытания предлагаемых технических решений, выполнить их экономическое обоснование.

Объект исследования – системы вентиляции при пневмотранспортной загрузке бункеров порошкообразными материалами.

Предмет исследования – методы снижения пылеобразования и повышения эффективности систем вентиляции.

Научная новизна работы состоит в следующем.

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

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

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

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

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

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

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

теории пограничного слоя и классической аэродинамики.

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

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

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

Положения, выносимые на защиту:

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

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

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

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

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

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

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

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2005-2016 гг.), 1-ом Международном форуме Актуальные проблемы современной науки (Самара, СГАСА, 2005), Всероссийской научно-практической конференции «Современные

проблемы технического естественно-научного и гуманитарного знания» (Губкин, 2007 г.), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь в начале нового столетия» (Губкин, 2008, 2011, 2015 гг.), II Международной научно-практической конференции «Современные проблемы науки образования и производства» (Нижний Новгород: НФ УРАО, 2010 г.), Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям «Эврика» (Юж.-Рос. гос. ун-т. (НПИ), Новочеркасск, 2011 г.), Всероссийском конкурсе «Инновационный потенциал молодежи 2012» (Ульяновский государственный университет. Ульяновск, 2011 г.), Международной конференции «Экология и здоровье человека» (Маврикий, 2012 г.), Международной конференции «Perspective innovations in science, education, production and transport» (Одесса, 2013-2014 гг.), European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences (Vienna, Austria, 2014 г.), I Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой памяти д-ра техн. наук, профессора, А. А. Сандера «Энергосбережение и энергоэффективность на промышленных предприятиях и в жилищно-коммунальном хозяйстве» (Новосибирск, 2016 г.), региональной научно-технической конференции по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области (Белгород, 2017 г.).

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

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

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЫЛЕВЫДЕЛЕНИЙ ПРИ ЗАГРУЗКЕ БУНКЕРОВ

1.1. Технологические и компоновочные решения складов порошковых материалов

Применение бестарного приема и отпуска, хранения и транспортирования сыпучих материалов значительно повышает уровень автоматизации, механизации производства, производительности труда, позволяет снизить пылевой выброс вентиляционной сети, а соответственно уменьшить потери материала и улучшить санитарно-эпидемиологическую обстановку на рабочем месте [1]. Поэтому в состав большинства современных производств строительных материалов, металлургической, химической, пищевой промышленности входят такие технологические емкости, как бункера [2-4].

1.1.1. Бункера порошкообразных материалов, как источник пылевого загрязнения

Согласно современной теории бункеров [5] из процесса их эксплуатации выделяют три взаимосвязанных этапа: загрузка материала; хранение, обусловленное технологией производства; выгрузка. На каждом этапе возможно применение специальных устройств и приспособлений, которые могут улучшить функциональные возможности емкостей.

Так для загрузки возможно использование различных подъемно-транспортных машин: ленточных конвейеров, норий, шнекового и пневматического транспорта. Пневмотранспорт считается наиболее современным и чрезвычайно эффективным способом транспортировки сыпучих материалов [4, 6-7], обеспечивая не только высокую производительность, но и долговечность, чистоту и безопасность работы [7-9]. При пневмотранспортировании материал изолирован от рабочей среды, тем самым обеспечивается беспыльность транспортировки, благодаря чему отпадает надобность в больших эксплуатационных и капитальных затратах на вытяжные устройства [6]. Предприятия, которые производят строительные материалы, активно применяют

системы пневмотранспорта для транспортировки и смешивания сыпучих материалов, таких как цемент, полевой шпат, металлическая пыль, известь, шлак, доломит, кальцит, зола, литейный песок, порошковые пигменты, добавки и др. веществ.

Применение систем пневматического транспортирования на предприятиях производства строительных материалов объясняется спецификой производства и потребления, связанной с однообразием транспортных операций, а также единством физико-механических свойств различных продуктов производства, определяющим пневмотранспортный процесс [6, 10].

Рассмотрим специфику транспортировки и хранения в условиях цементного производства. Выбор технологии зависит от физических характеристик сырья, в качестве основных следует выделить: сухой [11-14], мокрый [15, 16], полусухой, комбинированный способы производства. От данного выбора зависит назначение, а, следовательно, и тип применяемых бункеров.

При производстве цемента по сухому способу [11-14] (рисунок 1.1.) сырьевые материалы измельчают в дробилках. Сырьевая мука направляется в гомогенизационные силоса (один из видов бункеров, характеризующихся большой высотой и диаметром), которые могут быть оснащены дополнительными бункерами тонкоизмельченных добавок. В данных емкостях сырьевая смесь перемешивается и корректируется, затем поступает в расходные бункера и далее во вращающуюся печь. Полученный клинкер измельчается и направляется в склад хранения готовой продукции.

Мокрый способ [15-16] (рисунок 1.2.) применяется при высокой влажности и не постоянном химическом составе сырья. Выходящий из печи клинкер охлаждается, поступает на клинкерный склад (группа бункеров), для выдержки в течение определенного времени. Что обеспечивает бесперебойную работу завода, поскольку хранение материала в бункере создает постоянный запас клинкера. Кроме того, в них хранятся необходимые минеральные добавки. Готовый цемент загружают в склад хранения готовой продукции (цементные силоса).

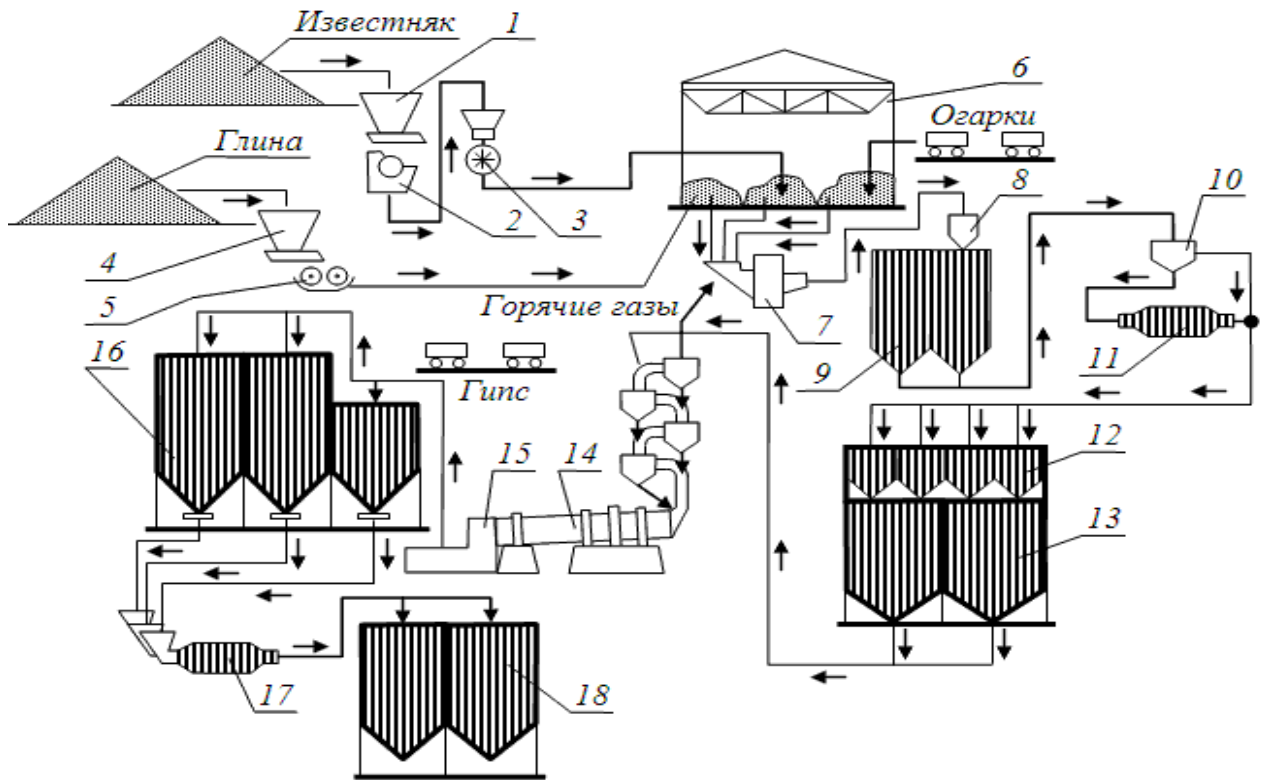


Рисунок 1.1. Технологическая схема цементного производства сухим способом:

1,4 – сырьевые бункера (1 – известняк, 4 – глина); 2, 3, 5 – дробилки; 6 – склад сырья; 7, 11, 17 – мельницы; 8 – циклон-осадитель; 9 – промежуточный бункер; 10 – сепаратор; 12 – гомогенизационный бункер; 13 – запасной бункер; 14 – печь; 15 – холодильник; 16 – склад клинкера и добавок; 18 – склад готовой продукции

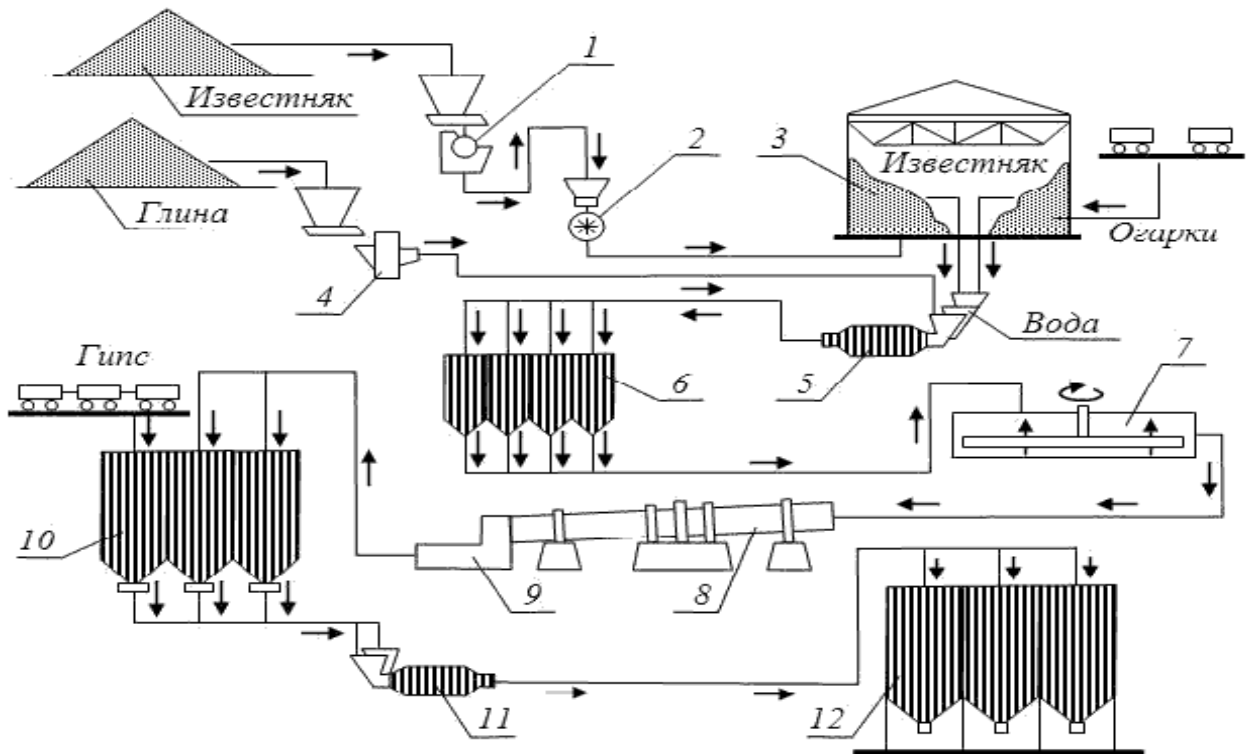


Рисунок 1.2. Технологическая схема цементного производства мокрым способом:

1, 2 – дробилки; 3 – склад сырья; 4, 5, 11 – мельницы; 6, 7 – бассейны шлама; 8 – вращающаяся печь; 9 – холодильник; 10 – клинкерный склад; 12 – склад готовой продукции

Таким образом, вне зависимости от способа производства цемента [17], технология диктует применение бункеров различного назначения, являющихся источниками пылеобразования [18, 19] вследствие локальных перегрузок пылящих (порошковых) материалов.

Особую актуальность системам обеспыливания придает то, что мелкодисперсная пыль обладает такими свойствами, как большая удельная поверхность, высокая адсорбционная способность, физическая и химическая активность, благодаря чему она легко проникает в организм человека, вызывая заболевания верхних дыхательных путей (хронический бронхит, бронхиальная астма, пневмокониозы), а также заболевания глаз, кожи и т.д. [20].

При реконструкции предприятий строительной промышленности [21], с целью повышения энергоэффективности, автоматизации, экологичности и безопасности внедряют системы автоматизации [22], пневмотранспорта [6, 23], аспирации [24, 25]. На рисунке 1.3 показан пример современного автоматизированного цементного производства.

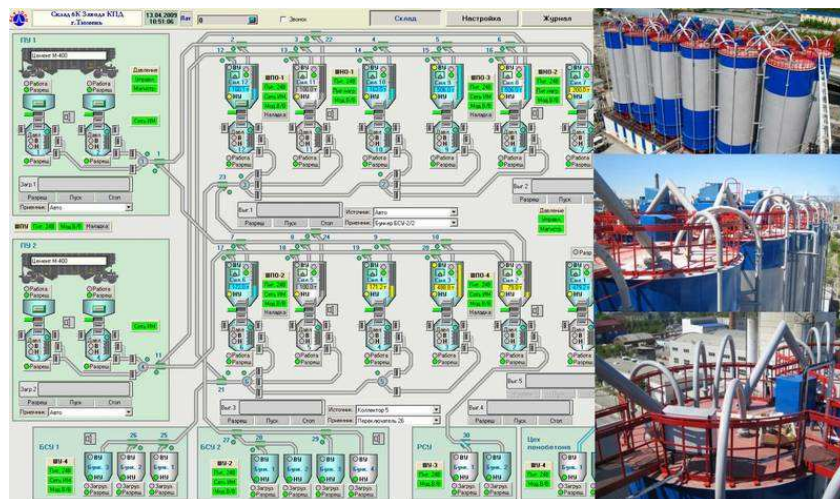


Рисунок 1.3. Пример мнемосхемы транспортировки и хранения цемента

Таким образом, не смотря на существенные различия в технологиях производства цемента можно сделать вывод, что применение комплекса герметичных бункеров и систем пневмотранспорта для хранения и транспортировки порошкообразных материалов имеет место в современном производстве, является экологичным, эффективным и актуальным техническим решением.

1.1.2. Обзор научных исследований в области пылеобразования при перегрузках сыпучих материалов

Процессам пылеобразования посвящено значительное количество научно-исследовательских трудов, в частности установлению условий и последствий образования пыли при перегрузках посвящены работы Бобровникова Н.А., Константинова А.Ф., Ларина Ю.А., Логачева И.Н., Минко В.А., Самсонова В.Т., Семенова А.М., Сервацка З. [2, 26-34], в которых выделены следующие особенности процесса: взаимодействие падающего материала с преградой; динамическое взаимодействие потока ускоренно падающего потока сыпучего материала и окружающей среды; эжекционная способность потока падающего материала; аэрирование падающего потока материала; влияние влажности сыпучего материала на его пылеобразующую способность; оседание частиц пыли.

При загрузке технологических емкостей (бункеров) основным местом пылеобразования так же является взаимодействие загружаемого потока с преградой (удар падающего материала о дно бункера, о слой ранее складированного (уложенного) материала и т.д.). Этому явлению посвящено существенное число работ: при работе конвейеров ленточного типа [2, 35], грейферных кранов [36, 37], а также при различных условиях взаимодействия падающего сыпучего материала (из трубопроводов пневмотранспортных установок или лент конвейеров) и преграды (дно технологических емкостей: бункера, вагона, трюма) [26-27, 34, 38, 39] и т.д.

В работах [40, 41] интенсивность пылеобразования, характеризующаяся концентрацией g (мг/с) пыли при взаимодействии материала с преградой в общем случае выражается:

$$g = f \left(E, \frac{v_k}{v_n}, Q_s, d, W \right), \quad (1.1)$$

где E - кинетическая энергия взаимодействия материала и преграды;

$\frac{v_k}{v_n}$ - отношение конечной и начальной скоростей материала; Q_s - количество

эжектируемого воздуха; d , W - характерный размер и влажность материала.

В работе [42] рассмотрено явление вертикального распределения концентрации g_h (мг/м³) пыли по высоте:

$$g_h = g_0 \exp(-n), \quad (1.2)$$

где g_0 - концентрация пыли в месте удара материала и преграды, приводящего ко взмётыванию материала; n - коэффициент распределения концентрации материала.

Эжектируемый расход воздуха $Q_э$ (м³/ч) при падении свободной струи, согласно работе [40], определяется из выражения

$$Q_э = Q_0 + Q_m, \quad (1.3)$$

где Q_0 - начальный расход воздуха в транспортирующем потоке, м³/ч; Q_m - расход воздуха, увлекаемого материалом, м³/ч. Величины Q_0 и Q_m определяются из выражений:

$$Q_0 = l \cdot q_э, \quad (1.4)$$

$$Q_m = v_э \cdot F \cdot 3600, \quad (1.5)$$

где l - характерная геометрическая характеристика поверхности потока, м;

$q_э$ - удельный расход воздуха, приходящийся на 1 м поверхности потока, м³;

$v_э$ - скорость воздуха, м/с; F - площадь поперечного сечения потока материала, м².

Отметим, что величины, входящие в уравнения (1.4) и (1.5) определяются по таблицам, данные для которых получены экспериментально, на моделях, как правило, в лабораторных условиях. Подобие (адекватность) моделируемых и натуральных процессов пылеобразования определяется критериями, основанными на теории размерностей и подобия, что характерно для физического моделирования. Они (методы) рассматриваются как приближенные, однако их значимость увеличивается при решении поисковых задач, когда структура и состав уравнений, описывающих процесс, не полны или не надежны. К числу таких задач относится пылеобразование при перегрузках порошкообразных материалов.

К фундаментальным трудам по теории подобия и методам моделирования следует отнести труды российских ученых Алабужева П.М., Бусленко Н.Н.,

Веникова В.А., Гухмана А.А., Кирпичева М.В., Седова Л.И. [43-47], а также работы зарубежных исследователей Клайна Д.С., Доула К., Майерса Дж. Е., Беннета К.О., и др. [48-51].

При физическом моделировании определяются факторы (физические параметры), позволяющие устанавливать подобие процессов, протекающих в условиях модель – натура при различных пропорциональных характеристиках. Качественные и количественные связи подобных явлений устанавливают в виде критериев подобия (укрупненных множителях основных физических параметров процессов). В соответствии с первой теоремой подобия численное равенство критериев подобия является необходимым условием подобия объектов [43-44].

В работе [28] указывается: «количество пыли, выделяющееся при свободном падении измельченного материала, зависит от расхода этого материала, его дисперсности, высоты падения и скорости организованного потока воздуха». Принятые автором критерии подобия предполагают использование в модельных исследованиях не основной материал, перегружаемый в том или ином производстве, а подобный натурному, т.е. его характеристики также должны соответствовать условию подобия. Такой подбор модельного объекта перегрузки связан с дополнительными исследованиями.

При определении скорости взметывающихся потоков необходимо учитывать результаты исследований [27, 52] в которых принято, что скорость потоков воздуха, образованных при ударе материала о преграду, будет близка к скорости свободного падения при столкновении с преградой.

Самсонов В.Т. в работах [33, 38, 52] указывает: «основной причиной пылеобразования при падении сыпучего материала является резкое уменьшение его пористости при встрече с преградой. Это приводит к образованию потоков воздуха, которыми и взвешиваются пылевидные частицы и распространяются в плоскости удара.» [52] При этом [38, 52] в качестве основных критериальных условий принимается геометрическое подобие модели и природы, а также критерий Фруда, отражающий соотношение инерции и сил тяжести для пылевоздушных потоков. В работе [33] отмечается: «скорость выхода воздушных струек из тела струи материала

в месте удара ее о преграду можно считать пропорциональной высоте падения» [33], данное утверждение основано на результатах опытов Калягина В.А. [53].

Известно исследование [28], посвященное оценке пылеобразования в результате соударения пневмотранспортного потока загружаемого материала и преграды в условиях загрузки судовых трюмов. Автор этой работы выделил три фазы процесса пылеобразования, аналитически определив концентрации пылевых потоков для каждой из них. Работа [28] основана на модельных исследованиях, в качестве условий подобия приняты геометрическое подобие и критерий Фруда. Однако использован натуральный сыпучий материал, что является нарушением модельного исследования принципа подобия явлений. Поэтому результаты исследований можно считать поисковыми, и требуют количественной оценки процесса пылеобразования в натуральных условиях.

Таким образом, основные рекомендации проведения модельного физического экспериментального исследования процессов пылеобразования при работе пневмотранспортных систем можно сформулировать так: выполнение модели геометрически подобной натурному объекту; использование натурального материала; соблюдение условий подобия падения и истечения материала в модели и натуре; соблюдение условий подобия взаимодействия пневмотранспортного потока о преграды, взметывания пылевых частиц в натуре и модели; соблюдение численно равных скоростей потоков.

В соответствии с данными исследованиями, основные факторы, влияющие на интенсивность пылеобразования можно разбить на три группы: конструктивные характеристики бункерных хранилищ; технологические параметры перегрузки; физико-механические свойства сыпучего материала.

Интенсивность распространения облака взвешенной пыли зависит от состояния воздушной среды вблизи источника пылеобразования, которое в свою очередь зависит от количества энергии, вносимой падающим материалом.

Значительное влияние на интенсивность пылеобразования оказывают технологические параметры перегрузки: начальная степень истечения, расход материала и транспортирующего воздуха, эжекционное давление, степень

заполнения бункера. Конструктивные характеристики бункерных хранилищ (геометрические характеристики бункеров, загрузочных устройств и т.п.) также вносят вклад на условия пылеобразования. Поэтому, с целью снижения количества образующейся пыли целесообразно, снижать не только высоту падения, начальный диаметр струи путем загрузки сыпучего материала несколькими струями меньших диаметров, но и предусматривать возможность организации воздухораспределения в полости бункера.

1.2. Технические решения и методика расчета систем обеспыливающей вентиляции бункеров

1.2.1. Конструктивное оформление систем аспирации бункеров

Из бункеров, наполняемых порошкообразными материалами, выделяется пыль [54-56], которая попадая в окружающую среду наносит экологический и социальный ущерб. Объясняется это тем, что движущийся материал эжектирует некоторое количество воздуха, при взаимодействии с поверхностью материала создается повышенное давление. В результате чего воздух взметывает частицы материала и стремится в зону более низкого давления (окружающую среду) [57].

Для того чтобы избежать выделения пыли из бункеров, их необходимо оснащать системами обеспыливающей вентиляции (аспирации) [2-3, 57-59]. Система аспирации – инженерная система, назначением которой является отведение и очистка запыленного воздуха от укрытий транспортно-технологического оборудования и рабочей зоны, которые необходимы на предприятиях, технологический процесс которых связан с выделением большого количества пыли, твердых частиц, газов и других вредных веществ [60-63].

Таким образом, аспирация, как процесс включает в себя 4 стадии: улавливание, транспортирование, очистку и рассеивание. В состав систем аспирации входят устройства для улавливания вредных примесей (различные отсосы и укрытия), воздуховоды, приемники отходов, вентиляторы, аппараты пыле-газоочистки и многое другое. Эффективность системы определяется по соотношению удаленных примесей к веществам, избежавшим утилизации и попавшим

в воздух рабочих помещений или окружающую среду [64-68].

При обеспыливании воздуха технологических устройств, оснащенных системой пневмотранспорта, выбор схемы и элементов аспирационных систем зависит от способа транспортирования материала [6, 8, 57, 69]: взвесью, плотным слоем, поршнями; вакуумным, нагнетательным или комбинированного [6, 7, 70]. На рисунке 1.4. показаны принципиальные схемы систем пневмотранспорта и аспирации при различных условиях движения материала.

Выбор обеспыливающего аппарата обусловлен физико-химическими характеристиками аспирационного потока, в частности дисперсного состава [71-72], плотности пылевых частиц, расхода, температуры потока воздуха [73-75]. При обеспыливании бункеров возможно применение индивидуальных и централизованных фильтров. Для обеспыливания воздуха от цементных силосов применяются как циклоны, рукавные фильтры, так и электрофильтры [76-78].

При использовании технического решения, показанного на рисунке 1.4 в цементной промышленности [11], в качестве обеспыливающего аппарата, как правило, принимаются циклоны ЦН-15. Место установки – надбункерная площадка, что обеспечивает разгрузку собранной пыли непосредственно в бункер. При недостаточной степени очистки у инерционного аппарата применяют двойную очистку: циклон-разгрузитель, циклон и рукавный фильтр [54, 58].

Типовые проекты систем вентиляции цементных силосов предусматривают установку противоточных рукавных фильтров, либо рукавные фильтры с авторегенерацией предложенные НИИцементом [57], устанавливаемые непосредственно на силосах. В этих фильтрах не предусмотрены процессы регенерации ткани, поэтому применяют рукава из гидрофобизированной стеклоткани, что обеспечивает периодический срыв накопившейся пыли без воздействия дополнительных устройств [77].

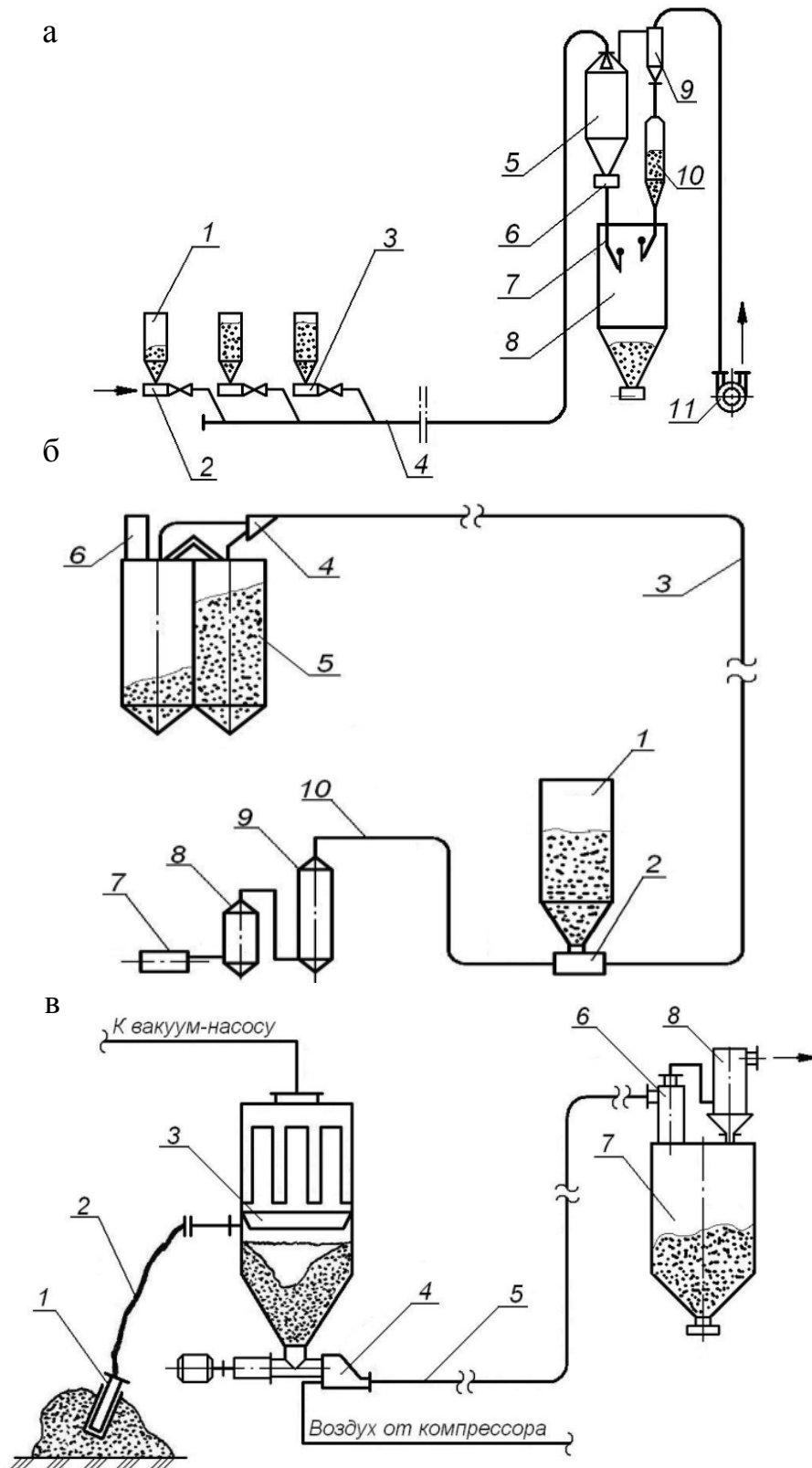


Рисунок 1.4 Принципиальные схемы систем пневмотранспорта и аспирации: а – при вакуумном способе загрузки: 1 – бункер, 2 – пылеприемная насадка, 3 – пробковый кран, 4 – транспортный трубопровод, 5 – осадительная камера, 6 – затвор, 7 – клапан-мигалка, 8 – сборный бункер, 9 – циклон, 10 – сборник пыли, 11 – вакуум-насос; б – при нагнетательном способе загрузке: 1 – бункер, 2 – пневмопитатель, 3 – трубопровод системы пневмотранспорта, 4 – переключатель потока, 5 – силос, 6 – рукавный фильтр, 7 – компрессор, 8 – влагомаслоотделитель, 9 – ресивер, 10 – воздухопровод; в – при комбинированном способе: 1 – заборное сопло, 2 – резино-тканевый рукав, 4 – пневмопитатель, 5 – транспортный трубопровод, 6 – циклонный разгрузитель, 7 – приемный бункер, 8 – рукавный фильтр

При установке централизованного рукавного фильтра на группу бункеров необходимо предусмотреть объединение полостей бункеров вентиляционными каналами [59], а также герметизацию бункеров, что обеспечит снижение нагрузки на обеспыливающий аппарат, а соответственно и долговечность ткани. Однако, такое решение, при установке фильтров типа СМЦ, выявило значительный недостаток: в связи со значительной концентрацией пылевых частиц рукава быстро забивались. Фильтр в лучшем случае играл роль пылесадительной камеры. Хотя современные фильтровальные ткани в большой мере позволяют избежать этого явления [32], но в связи с быстрым выходом из строя рукавов, а их стоимость чрезвычайно высока, производства, где имеются бетоносмесительные узлы не устанавливают вторую ступень очистки [79].

На рисунке 1.5 показан пример технического решения обеспыливающей вентиляции силосного склада цемента, при котором использован принцип буферного бункера и объединение полостей бункеров переточными каналами: «цемент из помольного цеха по аэрожелобам 1 поступает в приёмный бункер 2 пневматического насоса 3, к которому по воздухопроводу 4 подается сжатый воздух. Цемент в виде аэросмеси транспортируется насосом по цементопроводу 5. Из распределительного цементопровода 6 цементная аэросмесь через патрубки 13 направляется в силос 14. Скорость движения аэросмеси по трубопроводам от 15 до 25 м/с. Силосы соединены между собой трубопроводами 9, по которым воздух проходит из одного силоса в другой и через фильтры 8 удаляется из силоса в атмосферу. Наполнение силосов цементом контролируется уровнемерами 7» [80].

При загрузке в силосах образуется избыточное давление. Если полости цементных силосов соединены между собой воздухопроводами, то избыточное давление компенсируется посредством сброса воздуха из крайних бункеров в атмосферу, в некоторых случаях без пылеочистки [18].

Если бункера не объединены между собой вентиляционными каналами, то каждая емкость должна быть оснащена взрывными клапанами для сброса избыточного давления [19]. В этом случае при работе центрального пылеочистного аппарата возникает ряд проблем, связанных с не равномерностью потерь давления

в ответвлениях сети из-за различной протяженности, а соответственно и проблема с определением сечения данных воздуховодов, распределением вакуума, а также с вероятностью образования конденсации водяного пара на внутренней поверхности стенок.

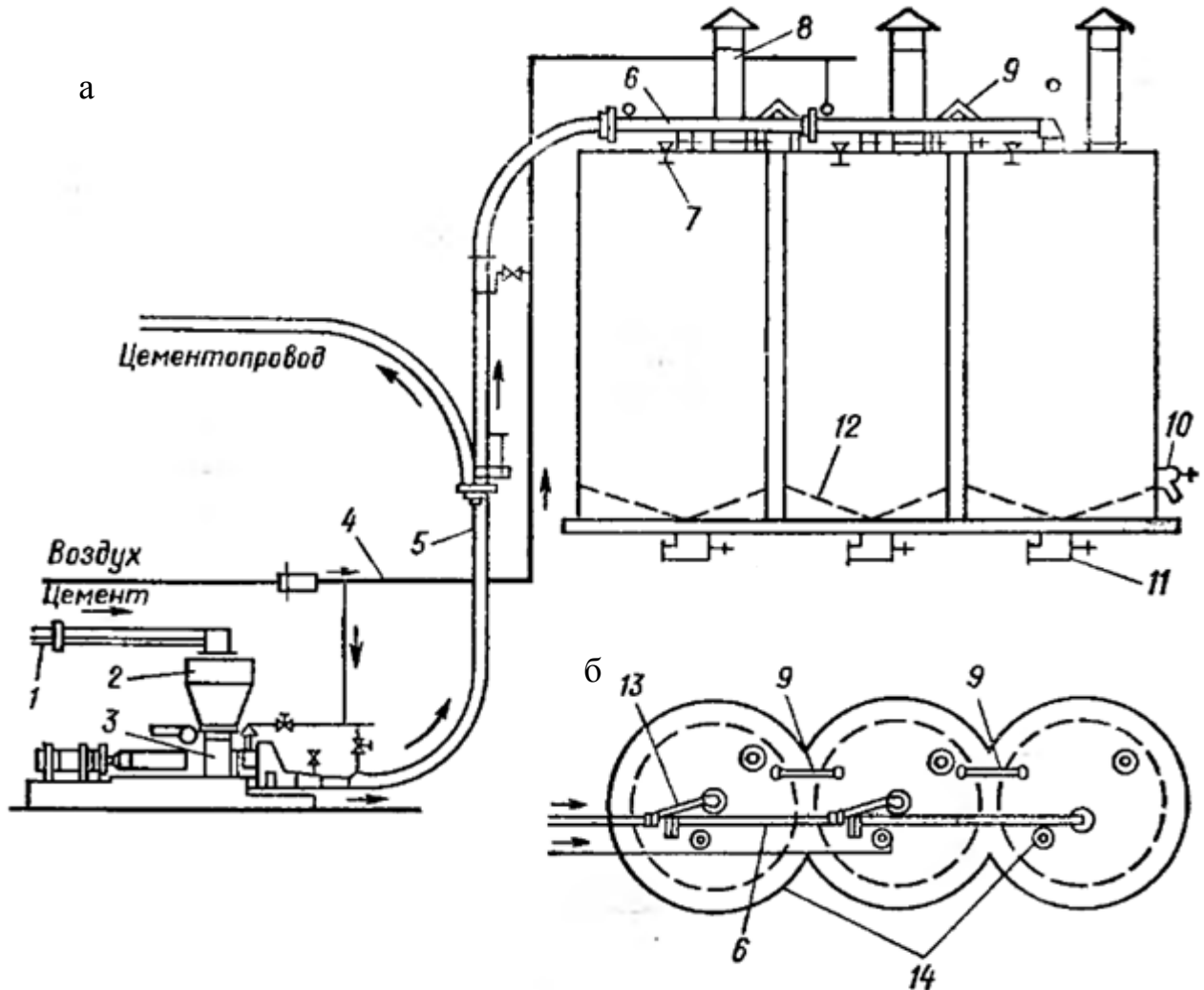


Рисунок 1.5. Силосный склад цемента: а – принципиальная схема установки и обвязки оборудования; б – фрагмент плана

При объединении полостей переточными каналами к недостаткам можно отнести то, что отсос аспирационного воздуха осуществляется из всех бункеров, включая загружаемый. Поскольку в нем происходят процессы вторичного пылеобразования при взаимодействии пневмотранспортного потока и уже складированного материала, то аспирационный воздух характеризуется повышенной запыленностью. Это приводит к интенсивному износу рукавного фильтра, а соответственно и снижению надежности его работы. Низкая надежность

устройств обеспыливания является причиной загрязнения рабочей зоны и окружающей среды.

Этот недостаток устраняется за счет того, что в группе бункеров, показанных на рисунке 1.6: «воздухозаборные трубопроводы одними концами параллельно подсоединены соответственно к первому и последнему в ряду силосам, а другие концы соединены с фильтром посредством элемента переключения, выполненного в виде шарнирно закрепленной задвижки. Элемент переключения работает так, что при загрузке первого и второго силосов элемент переключения подключает воздухозаборный трубопровод к последнему силосу. При загрузке последующих силосов забор воздуха ведется из последнего силоса до тех пор, пока суммарное количество силосов, начиная с загружаемого силоса до последнего не станет меньше их количества, начиная с первого до загружаемого» [81].

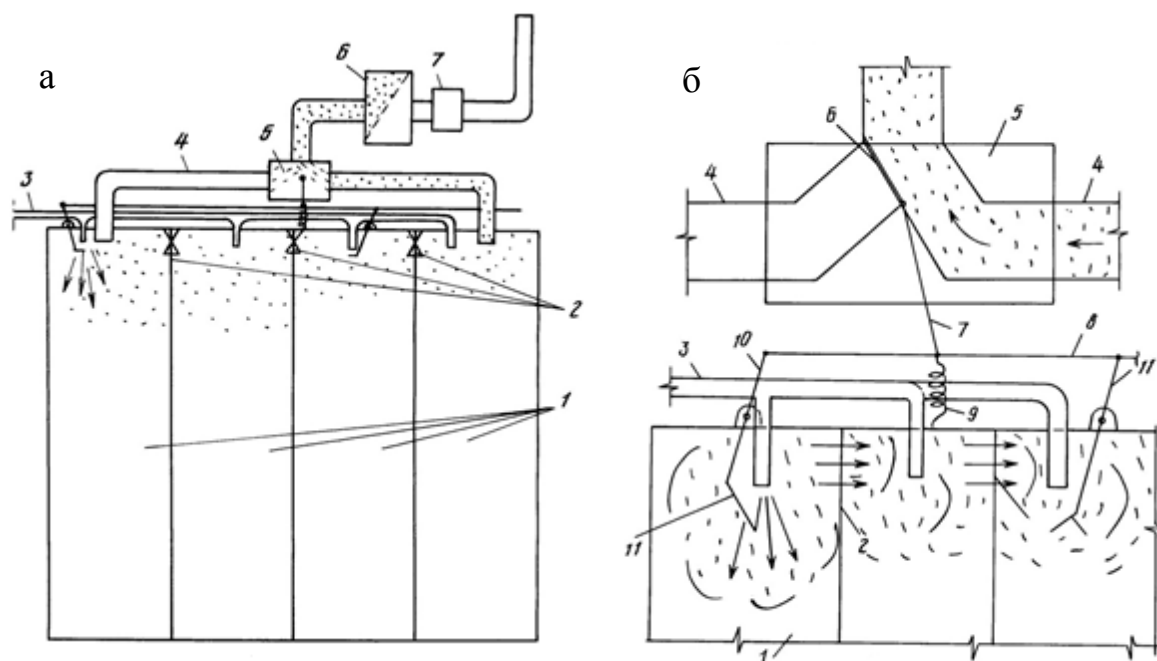


Рисунок 1.6. Хранилище для сыпучих материалов с пневмотранспортной загрузкой [1]:
 а – хранилище; б – элемент переключения: 1 – бункер, 2 – воздушные каналы, 3 – трубопровод пневмотранспорта, 4 – воздухозаборный трубопровод, 5 – элемент переключения, 6 – рукавный фильтр, 7 – вытяжной вентилятор, 8 – тяга, 9 – пружина; 10, 11 – рычаги.

Таким образом, запыленный воздух из заполняемого силоса проходит через каналы в промежуточных силосах и, наконец, в последний, из которого производится отсос воздуха. В силосах, выполняющих роль пылесадительных камер, соединенных в каскад, происходит осаждение пыли, за счет снижения

скорости витания частиц пыли, и лишь мелкая пыль, на которую не действуют силы гравитации, попадает в рукавный фильтр. Получается двухступенчатая очистка воздуха от пыли: первая ступень – группа бункеров (как пылеосадительная камера большой длины), вторая – рукавный фильтр.

Следовательно, при проектировании систем обеспыливания аспирационного воздуха, отводимого от бункеров необходимо учитывать условия повышенного пылеобразования в загружаемом бункере, по возможности применять переточные каналы для снижения данного эффекта. Кроме того, нарушения работы систем вентиляции: «когда на предприятиях существующие системы аспирации цементных силосов не эксплуатируются, находятся в нерабочем состоянии, либо не обеспечивают требуемых аспирационных объемов» [19]. В результате чего, из бункеров, находящихся под избыточным давлением, из взрывных клапанов выбивается пыль, попадая в рабочую зону.

Рассмотренные системы аспирации бункеров, в частности цементных силосов, а также пути их усовершенствования, рекомендуются к применению, так как это позволит: усовершенствовать газоочистительную систему; снизить расходы на обслуживание системы аспирации; улучшить техническое оснащение; исключить выбросы газов и пыли в цех и окружающую среду; снизить потери продукта – сырья, с возвратом в производственный процесс.

1.2.2. Конструктивное оформление узлов загрузки бункеров

Конструкции применяемых аспирационных укрытий для бункеров зависят от способа их загрузки и разгрузки, а также и других факторов [26].

В работах [82-83] представлены классификации загрузочных устройств. Существующие классификации предусматривали рассмотрение загрузки обобщенно, на всех стадиях: с транспортеров, норий, отпускных труб и т.д. [84]. Предлагается рассмотреть классификацию по функциональному назначению устройств. Как правило, загрузочные устройства решают определенные технологические задачи, связанные с разгрузкой и хранением материала: «снижение насыпной плотности, увеличение статической нагрузки емкости, снижение сегрегации материала и др.»

[83]. Однако, режим работы загрузочных устройств так же влияет и на работу системы обеспыливающей вентиляции: уменьшая или увеличивая концентрацию частиц материала в аспирационном воздухе.

Обычно выделяют три способа загрузки бункеров различного назначения сыпучими грузами: струей (без дополнительных устройств), дождем (с использованием распределителей или разбрасывателей потока) и каскадная загрузка.

Шевандиной В.М. отмечено: «при заполнении силоса компактной струей (самотеком), происходит интенсивное оседание частиц груза, и в нижних слоях отмечаются большие сжатия и объемная плотность. При заполнении бункеров по методу разбрасывания (по типу дождя или душа), материал оказывается распределенным по поперечному сечению силоса с более равномерной плотностью» [85].

В работах [85-86] и др. отмечается, что при загрузке самотеком характерно расслоение материала (сегрегация): крупные и более округлые частицы по поверхности насыпи перемещаются к стенкам бункера. Кроме того, образуемая при этом насыпь (рисунок 1.7 а, б) снижает заполняемость бункера [86]. Наиболее простой (и наименее предпочтительной) является загрузка компактной струей. Такой способ характеризуется наибольшим количеством эжектируемого падающим материалом воздуха, а соответственно и повышенной интенсивностью пылеобразованием при соударении струи падающего материала со слоем ранее складированного (уложенного) материала или дном бункера.

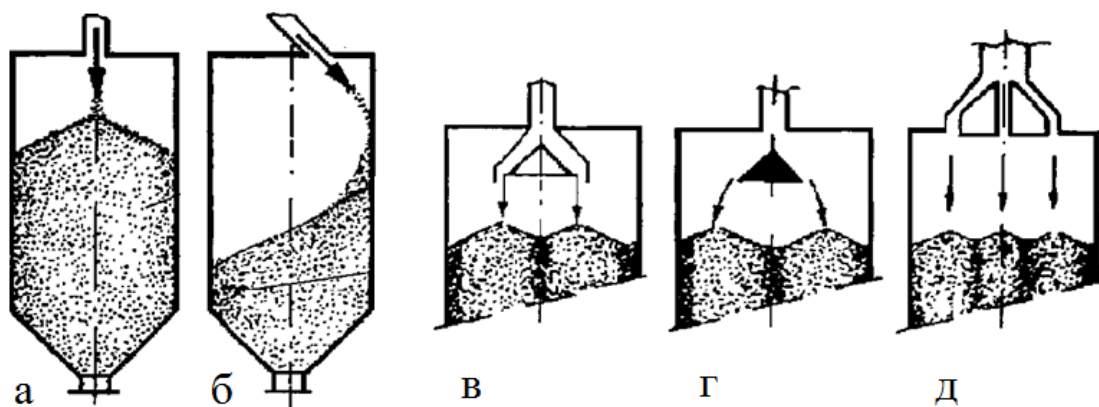


Рисунок 1.7. Способы загрузки бункеров: а - центральное заполнение; б – наклонной струей; в, г - заполнение разбрасыванием; д — заполнение в нескольких токах.

Для загрузки «дождем» (рассредоточенного потока), характерна равномерная укладка загружаемого материала. Отсутствие насыпи обеспечивает увеличение вместимости (относительно загрузки струей). Однако при незначительном рассредоточении загрузки может проявиться сегрегация (рисунок 1.7 в, г).

Существуют различные варианты классификации загрузочных устройств: по конструктивным особенностям [87], назначению [88], роду привода [89], и т.д. Представляется целесообразным классифицировать их по исполнению загрузки, а также налагаемых на них функциональным назначением, такая классификация представлена на рисунке 1.8.

Кроме того, следует учитывать и характер загрузки:

- равномерная, т.е. постепенное заполнение емкостей равномерной подачей материала (например, накопительных бункеров);
- с быстрым (залповым) заполнением, т.е. единовременное заполнение порцией материала всего объема закрытой полости или большей части ее.

Известно устройство для перегрузки сыпучего материала [2], соответствующее загрузке способом «дождем», за счет особого исполнения конструкции загрузочного узла, в нижней части которого закреплены две отводящие трубы с гофрированными стенками (рисунок 1.9 а). Благодаря этому решению имеется возможность выбора направления транспортирования материала.

Загрузочное устройство [91], исключает пылеобразование за счет снижения высоты падения материала. Его конструкция представлена на рисунке 1.9. б: материал, попадая в желоб, представляющий собой гофрированный желоб, по мере заполнения растягивает его. При достижении дна емкости, от соприкосновения с преградой открывается заслонка и обеспечивается перегрузка материала из желоба в бункер.

Загрузочное устройство [92], изображенное на рисунке 1.9. в, соответствует загрузке струей, однако благодаря своим конструктивным особенностям: оно состоит из цилиндрических труб, соединенных между собой хомутами с пропущенным через них тросом, обеспечивает исключение эжектирования окружающего воздуха, а также снижение высоты загрузки.

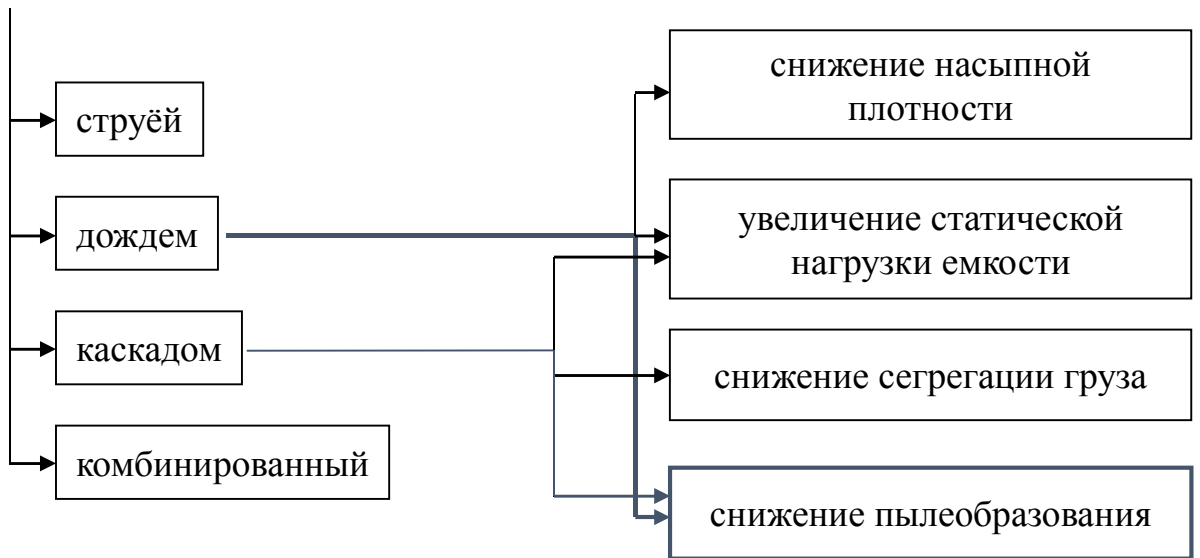


Рисунок 1.8. Классификация загрузочных устройств по исполнению загрузки

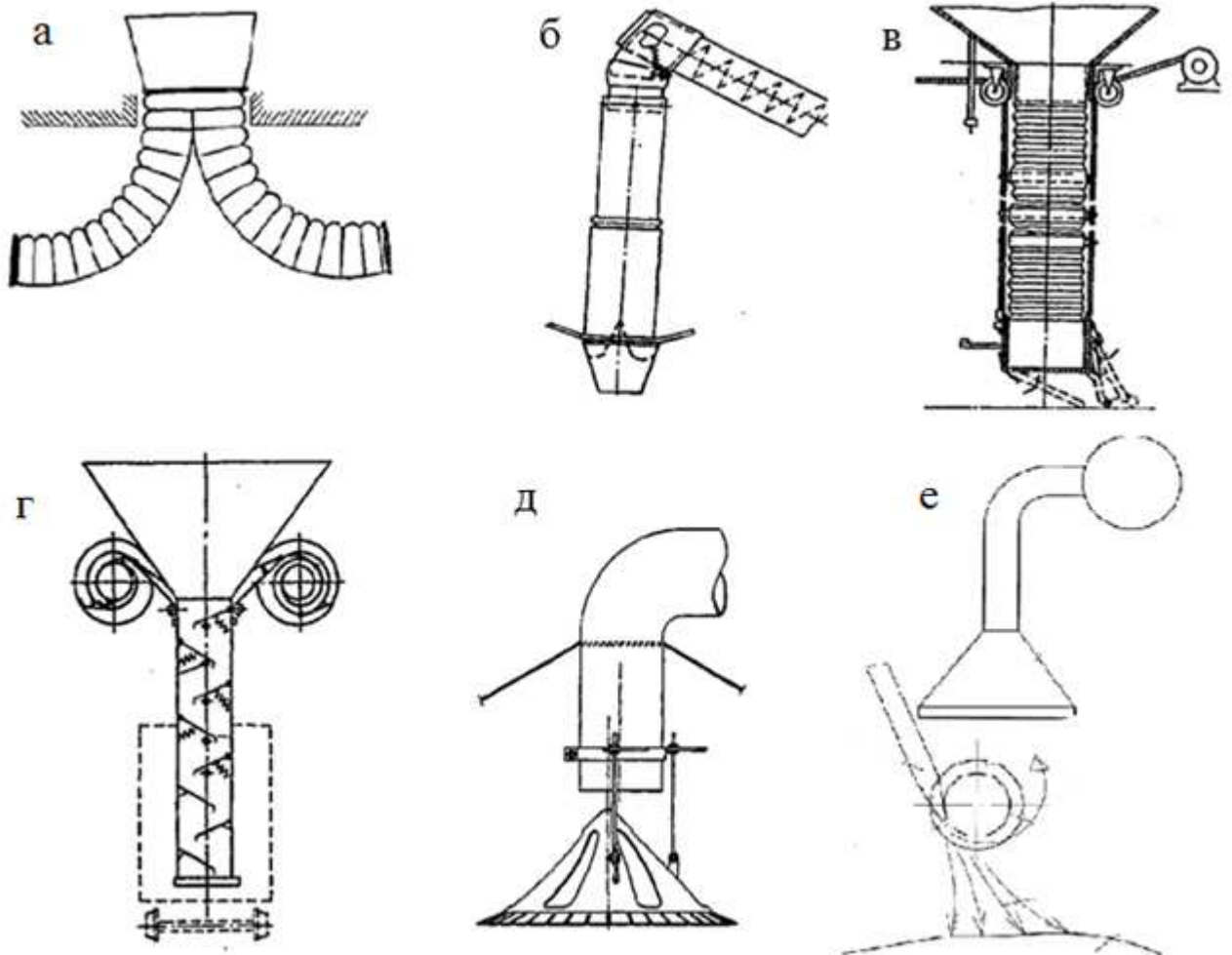


Рисунок 1.9. Загрузочные устройства различных типов: а - устройство для перегрузки сыпучего материала (а.с. 1615082 SU); б - гравитационный спуск (а.с. 1557021 SU); в - устройство для транспортирования сыпучих материалов (а.с. 1742169 SU); г - каскадное загрузочное устройство; д - устройство для распределения сыпучего материала в бункере (а.с. 1381039 SU); е - устройство для снижения пылеобразования (пат. 2185316 RU)

Применение каскадных загрузочных устройств [85] (рисунок 1.9 г) также обеспечивает снижение образования пыли вследствие уменьшения высоты свободного падения. Главным недостатком устройства является громоздкость конструкции, ограничивающая использование полезного пространства бункера.

Конусные распределители соответствуют исполнению загрузки типа «дождь». При их использовании снижается сегрегация материала и увеличивается равномерность заполнения бункера. Устройство [93], показанное на рисунке 1.9 д, состоит из распределительного конуса с отверстиями. В результате использования такого загрузочного устройства исключается конусообразная форма насыпи, а, следовательно, и сегрегация.

Основная задача загрузочного устройства [94], представленного на рисунке 1.9 е разделение потоков воздушной среды и потока материала, в результате данной сепарации снижается вторичное взметывание материала.

В результате проведенного аналитического обзора конструкций загрузочных узлов можно заметить прямую зависимость между повышением эффективности обеспечения качественных характеристик загрузки и повышением сложности конструкции и эксплуатации. При этом загрузочные устройства, задачей которых является повышение экологических характеристик, т.е. снижение пылеобразования, зачастую негативно влияют на другие технологические характеристики, такие как образование конусообразной насыпи и сегрегацию материала. Использование некоторых загрузочных устройств ограничено потребностью в дополнительной электроэнергии, поэтому для снижения энергоемкости процесса загрузки представляют интерес способы, сочетающие использование естественных сил гравитации и центробежных сил, создаваемых приводом рабочего органа устройства.

Таким образом, для повышения условий эксплуатации бункеров необходимо уделить внимание разработке эффективных конструкций загрузочных узлов, способствующих равномерной загрузке, отсутствию сегрегации и сохранности материала, т.е. исключению вторичного взметывания уже уложенного материала в бункере. При этом следует стремиться к минимальным затратам на производство и

обслуживание, учитывать конструктивные характеристики: оптимальные габариты, минимальное энергопотребление (или его полное отсутствие), высокую надежность, а также возможность влияния загрузочных устройств на улучшение санитарно-эпидемиологической обстановки в рабочей зоне.

1.2.4. Методика расчета систем обеспыливающей вентиляции

При загрузке бункеров с помощью системы пневмотранспорта учитывается количество сжатого воздуха, используемого для транспортирования материала, а также количество воздуха, вытесняемого загружаемым материалом :

$$Q_a = Q_{сж} + Q_m, \quad (1.6)$$

где $Q_{сж}$ - количество сжатого воздуха, приведенного к нормальному барометрическому давлению региона, где расположено промпредприятие, м³/ч.

Определяя расход аспирационного воздуха для бункеров, соединенных преточными каналами учитывается расход воздуха, поступающего из отводных труб Q_o [95]. Наибольший объем аспирации в этом случае будет при загрузке самого удаленного бункера. Количество воздуха, поступающего из заполняемого бункера в смежный бункер:

$$Q_{o3} = Q_{сж} + Q_m + Q_n. \quad (1.7)$$

Причем разрежение в полости смежного бункера будет выше на величину потерь давления в байпасе:

$$P_{\bar{o}} = P_a + \xi_n \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_{o3}}{S_n} \right)^2, \quad (1.8)$$

где ξ_n - коэффициент местного сопротивления канала, объединяющего полости смежных бункеров; S_n - площадь поперечного сечения данного канала, м².

Тогда объем аспирационного воздуха, удаляемого от бункера составит:

$$Q_a = Q_{o3} + F_H \sqrt{\frac{2P_{\bar{o}}}{\rho \cdot \xi_H}}, \quad (1.9)$$

В случае, если удаление воздуха производится не из смежного, а, например, N-ного бункера (обозначим загружаемый бункер ($Q_{o3} = Q_{o1}$)), имеем:

$$Q_a = Q_{o1} + \sum_{i=2}^N Q_{ni}, \quad (1.10)$$

$$Q_{ni} = F_{ni} \sqrt{\frac{2P_{\delta i}}{\rho \cdot \xi_H}}, \quad (1.11)$$

где Q_{ni} - расход воздуха, поступающего через неплотности i -го бункера (площадью F_{ni} , м²) под действием разрежения $P_{\delta i}$, определяемого по формуле:

$$P_{\delta i} = P_a + \sum_{j=1}^i \xi_{nj} \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_{oj}}{S_{nj}} \right)^2; \quad i = 2, 3, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, i. \quad (1.12)$$

При определении расхода аспирационного воздуха проходящего через переточные каналы Q_{oi} , его значение увеличивается на величину расхода, поступающего через неплотности предыдущих бункеров:

$$Q_{oj} = Q_{o1} + \sum_{k=1}^j Q_{nk}, \quad k = 2, 3, \dots, j. \quad (1.13)$$

Когда бункер используют для хранения порошкообразных материалов, которые, как известно, склонны к слеживанию, для повышения текучести материала и предупреждения образования «мертвых» остатков днища емкостей оборудуются системами аэрации. Они обычно состоят из ряда воздухораспределительных коробок (аэрокоробок), уложенных и закрепленных к днищу. Потребный расход сжатого воздуха на аэрацию, учитываемый в воздушном балансе бункера, определяется по формуле:

$$Q_{aэ} = q_{aэ} \cdot F_{aэ}, \quad (1.14)$$

где $q_{aэ}$ - удельный расход сжатого воздуха (для цементных силосов нм³/мин на 1 м² площади аэрации группы аэрокоробок, в которую сжатый воздух подается поочередно с интервалами 5-10 минут); $F_{aэ}$ - полезная площадь аэрации группы аэрокоробок, обычно он равна 70-80 % от площади аэрокоробок, м².

Таким образом, расчет по приведенной методике позволяет наиболее точно определять объемы аспирационного воздуха, удаляемого из полости бункера, в целях предотвращения выбивания запыленного воздуха в атмосферу.

Основной задачей проектирования систем пылеочистки является удовлетворение требований по эффективности очистки выбросов по остаточной концентрации (C_k) с наименьшими затратами, обеспечение надежности работы пылеуловителей и удобство их эксплуатации.

Расчет эффективности пылеочистки, в основу которого положен логарифмически нормальный закон распределения частиц пыли по размерам и зависимость эффективности пылеулавливания от диаметра улавливаемых частиц называется вероятностным методом НИИОГАЗА [96]. Согласно которого степень очистки пылеуловителя окончательно рассчитывается по зависимости:

$$\eta_{\text{общ}} = \Phi(t) = \frac{1}{2} \pi (\exp)^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (1.15)$$

где $\Phi(t)$ - интеграл Гаусса, который определяется по специальным вероятностным таблицам; параметр t , определяется по формуле:

$$t = \frac{\lg d_{50} - \lg d_{\#50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_n + \lg^2 \sigma_{\#}}}, \quad (1.16)$$

где σ_n , d_{50} – параметры дисперсности пылевых частиц

После определения группу пыли по её дисперсности, выбирается класс и тип пылеуловителя, необходимый для достижения требуемой эффективности пылеулавливания. При выборе типа пылеуловителя учитывают следующие показатели: степень пылеулавливания, сопротивление пылеуловителя, от которого зависит экономичность процесса пылеулавливания; габаритные размеры и масса пылеуловителя, надежность и простота его обслуживания.

Аэродинамический расчет сети производится с целью определения суммарного давления, соответствующего расчетному расходу воздуха по всем участкам. Аэродинамический расчет систем аспирации рекомендуется проводить по методу скоростных (динамических) давлений, в котором потеря давления на трение заменяется эквивалентной потерей давления на местные сопротивления. Металлические воздуховоды систем аспирации следует предусматривать только их прямых участков, отводов, тройников и крестовин круглого сечения [97].

При перемещении малозапыленного воздуха с концентрацией массы смеси (отношением массы транспортируемого материала к массе воздуха) $\mu < 0,01$ кг/кг, потери давления на участке вентиляционной сети определяется по формуле:

$$P = (\xi_{\vartheta} + \sum \xi) P_{\vartheta}, \quad (1.17)$$

где ξ_{ϑ} – приведенный коэффициент трения,

$$\xi_{\vartheta} = \frac{\lambda}{d} l. \quad (1.18)$$

Минимальная скорость движения воздуха в воздуховодах в зависимости от характера транспортируемого материала принимается по технологическим данным соответствующих отраслей промышленности. Скорость движения воздуха в воздуховодах должна быть более скорости витания частиц транспортируемого материала.

При перемещении воздуха с концентрацией массы смеси более 0,01 кг/кг потери давления в сети на трение, местные сопротивления и подъем транспортируемых с воздухом примесей P_n (кгс/м²) определяются по формуле:

$$P_n = 1,1 \sum [P(1 + K\mu)] + \sum l_g \vartheta, \quad (1.19)$$

где K – опытный коэффициент, зависящий от характера транспортируемого материала. Величины K и μ принимаются по технологическим данным соответствующих отраслей промышленности; l_g – длина вертикального участка воздуховода, м; ϑ – объемная концентрация смеси, равная отношению массы транспортируемого материала к объему чистого воздуха.

При расчете воздуховодов систем аспирации сначала определяют расход транспортируемого материала и количества транспортирующего воздуха, исходя из рекомендуемой концентрации массы смеси. При отсутствии данных о количестве транспортируемого материала расход воздуха определяется исходя из минимально допустимого диаметра воздуховода (80 мм) и скорости движения воздуха.

Воздуховоды систем аспирации рассчитываются из условия одновременной работы всех отсосов. Неувязка потерь давления по отдельным участкам сети

должна быть не более 5 %.

Регулирование потерь давления задвижками или дроссельными клапанами не допускается. Для увязки потерь давления допускается:

- увеличивать количество воздуха, удаляемого от того или иного отсоса;
- устанавливать диафрагмы на вертикальных участках систем аспирации при сухой неслипающейся и не волокнистой пыли.

Расчетная производительность вентиляторных агрегатов систем аспирации принимается с учетом подсоса или потери воздуха в системах [97]. Поскольку основными потребителями электроэнергии в системах аспирации являются тягодутьевые средства, то основными мерами, направленными на повышение энергосбережения являются: минимизация объемов аспирации и минимизация потерь давления в элементах сети [98].

1.3. Анализ закономерностей изменения направления воздушных струй, движущихся вдоль криволинейной поверхности

Одним из рациональных и перспективных способов организации движения воздушных потоков с целью разделения потоков сыпучего материала и транспортирующего воздуха при пневмотранспортном складировании в бункерах является введение в состав обеспыливающей вентиляции загрузочных устройств, использующих эффект Коанда.

Согласно сложившейся научной терминологии под термином "эффект Коанда" подразумевают несколько различных аэрогидродинамических явлений [99], названных по имени румынского изобретателя, который нашел им практическое применение, разработав несколько устройств [100-104], использующих один или несколько следующих свойств потока.

1. Тенденция струи жидкости, приближающейся к криволинейной поверхности, оставаться прикрепленной к ней – эффект пограничного слоя, который характеризует широкий спектр природных явлений.

2. Способность струи жидкости присоединяться к близлежащей поверхности.

3. Свойство струйных потоков (наиболее часто используется в аэродинамике),

движущихся у выпуклых криволинейных поверхностей, эжектировать окружающую среду, изменяя при этом направление движения.

Несмотря на широкое использование эффекта Коанда в различных отраслях техники [105-107], а также посвящения международных проектов и конференций [108-109], тем не менее, часто отмечается недостаточность информации о поведении коандовских течений [79, 110].

Наиболее значительное распространение эффект получил в струйной пневмоавтоматике [111-114], но в создании значительной теоретической базы, для данной отрасли техники, не было необходимости, поскольку определяется лишь конечное положение струи: наличие отклонения от первоначального направления.

Эффект Коанда имеет место и в теплоэнергетике: он наблюдается при работе камерных топков всех конструкций. Несмотря на это теоретическое его изучение в данной области весьма незначительное, стремясь создать условия для исключения возможности появления коандовских течений [106].

Исключительную роль эффект Коанда играет в вентиляции, «где без его учета невозможно надежное проектирование эффективных вентиляционных систем в зданиях и помещениях» [105].

Одним из фундаментальных научных трудов, посвященных эффекту Коанда является работа Newman [115-116], содержащая результаты исследования двумерного течения вокруг кругового цилиндра (схема течения приведена на рисунке 1.10). Newman отметил что эффект Коанда при движении по криволинейной поверхности является следствием баланса центробежной силы и радиального давления [115, 117]. При выходе струи из сопла, из-за наличия вязкого сопротивления потока и твердой стенки, его контактное давление с поверхностью ниже, чем давление окружающей среды. Этот перепад давления является основной причиной сцепления потока и криволинейной поверхности. Контактное давление вдоль поверхности увеличивается и постепенно достигает значения атмосферного, что обуславливает отрыв струи от поверхности.

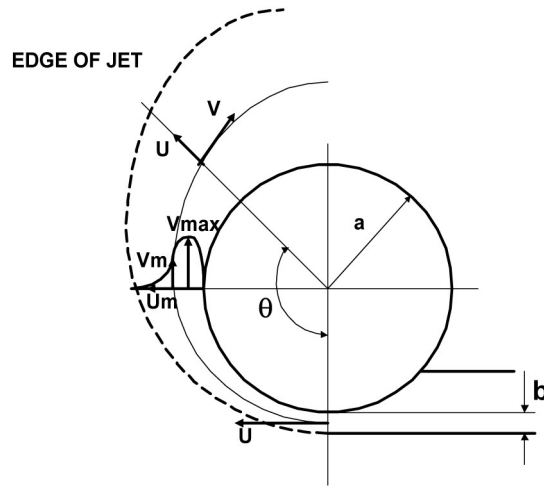


Рисунок 1.10. Схема экспериментальной установки Newman [115]

Bradshaw [118] объяснил эффект Коанда в условиях безвихревого невязкого потока: предполагая поток изначально невязким, описал поведение потока неравенством давлений потока и окружающей среды:

$$\frac{\rho \cdot U^2 \cdot b}{a} < p_{\infty} \cdot \quad (1.20)$$

где: ρ - плотность потока, U - скорость, b - ширина щели сопла, a - радиус кривизны поверхности (см. рисунок 1.10).

Неравенство Bradshaw является не точным, поскольку в реальных вязких течениях прилипание струи жидкости с криволинейной поверхностью вызывает увеличение толщины струи, движущейся вдоль поверхности с уменьшением средней скорости из-за неблагоприятного градиента давления. При этом средняя скорость уменьшается, а давление потока у стенки увеличивается и в конечном итоге становится равным атмосферному, что и приводит к отрыву от поверхности [118]. Таким образом, Bradshaw показал действие эффекта Коанда для невязких течений в соответствии с балансом центробежных сил, и выявил причины отделения струи от криволинейной стенки в действии вязких эффектов.

Другое объяснение эффекта Коанда для прикрепления вязкой струи жидкости к поверхности дали Patankar U.M. [119] и Rask R.B. [120]: цилиндр препятствует вовлечению (эжекции) окружающей среды в струйное течение, что вызывает уменьшение давления у поверхности и торможение потока.

Таким образом, для описания любого двумерного коандовского течения,

например, показанного на рисунке 1.10, в качестве основных геометрических параметров выделим: угол отрыва θ ; ширину сопла b ; радиус кривизны a , а также физические параметры движения потока: число Рейнольдса Re , перепад давления $p_s - p_\infty$, (где p_s – давление на срезе сопла). При этом следует учитывать утверждение [117? 121-122] о независимости турбулентного течения от вязкости при больших значениях критерия Рейнольдса, при нахождении окружающей среды в состоянии покоя. Таким образом, перепад давления становится независимым параметром на некотором расстоянии от среза сопла по течению потока.

По результатам аналитического исследования коандовских течений при высоких числах Рейнольдса Newman [115] предложил уравнение для определения угла отрыва в зависимости от перепада давления, геометрических характеристик и свойств жидкости:

$$\theta_{sep} = f \left[\left(\frac{(p_0 - p_\infty) \cdot b \cdot a}{\rho \cdot v^2} \right)^{0.5} \right]. \quad (1.21)$$

Согласно уравнению (1.21) для вязкого течения можно получить угол отрыва около 240° . Данный результат подтвержден экспериментально и другими исследователями: Fekete [123] получил угол отрыва в 210° , а Rask [120] – 225° .

Wille и Fernholtz [108] предположив, что геометрия выхода сопла является основным фактором создания коандовского течения, перешли от предположения о радиальной форме осевой линии струи [115] к логарифмически спиральной кривизне струи. Проведя серии экспериментов при различных способах истечения, показанных на рисунке 1.11 определили, что небольшой уступ (высота = $0.03 b$), размещенный на внешней кромке сопла может увеличить угол отклонения.

Некоторые из экспериментов были повторены Giles и другими соавторами [124], подтвердив результаты исследований Wille и Fernholtz, продемонстрировав подчинение коандовских струй закону сохранения импульса.

В своей работе Newman и Guitton [125] пересмотрели логарифмически спиральную концепцию, приняв утверждение Giles и др. о сохранении импульса структуре струи, распространяющейся по логарифмическим спиральям, однако они

обнаружили значительные расхождения экспериментальных и аналитических результатов, определяемых уравнениями движения (см. рисунок 1.12). Newman [126] произвел также обзор течений турбулентных криволинейных коандовских течений, отметив преобладающее значение импульса струи над силами трения с поверхностью. Он предположил, что при высоких числах Рейнольдса силы вязкости и трения незначительны.

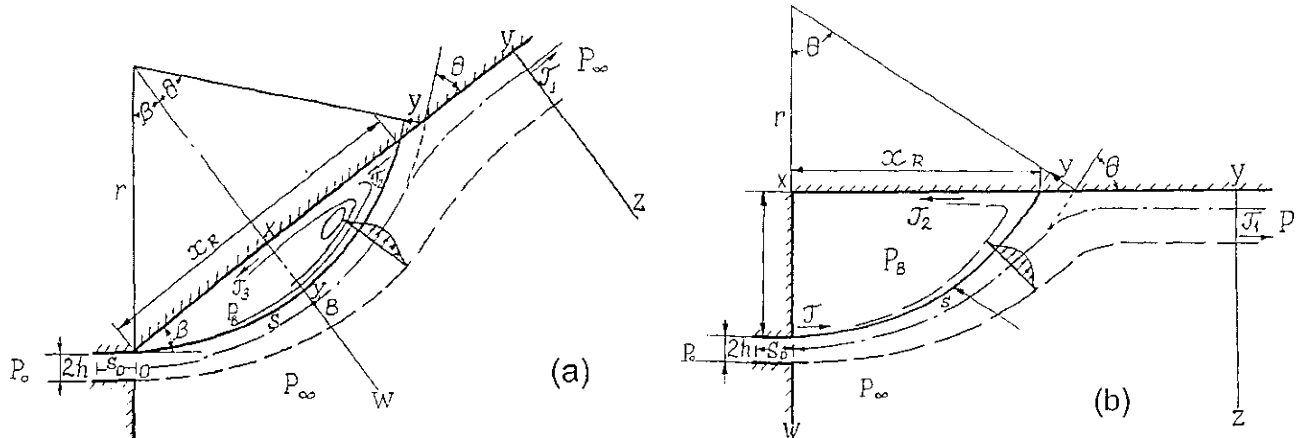


Рисунок. 1.11. Схема коандовского течения: а - для наклонной плоскости; б - для параллельной плоскости при наличии уступа.

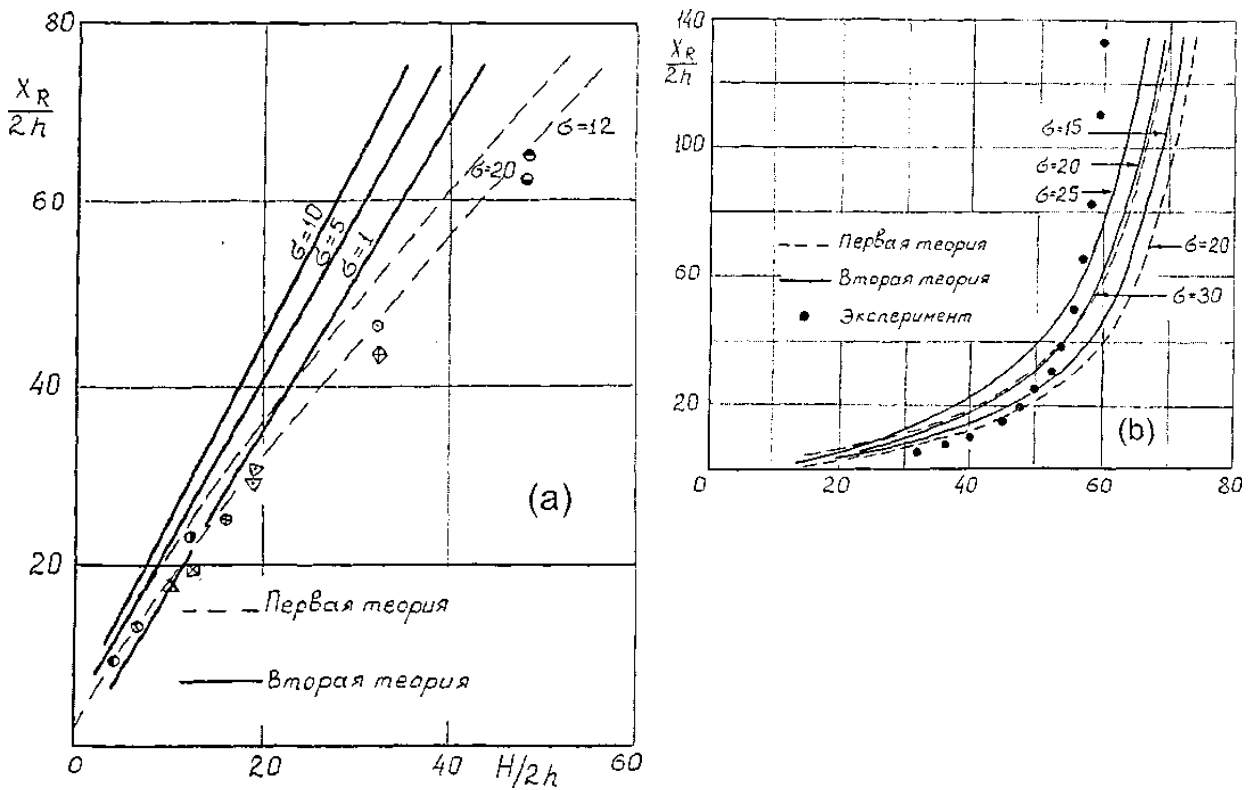


Рисунок 1.12. Координата точки присоединения струи по данным Newman:

а) - истечение параллельно плоскости при наличии уступа; б) - при истечении под углом к плоскости

Neuendorf и Wygnanski [127] уточнили предыдущие исследования коандовских турбулентных двумерных течений у криволинейной поверхности. Используя камеру статического давления они устранили ошибку, приводившую к более раннему отрыву струи от криволинейной поверхности, показав, что «разность давлений между камерой осаждения и помещением была меньше динамического давления»:

$$p_0 - p_\infty < \frac{1}{2} \rho \cdot U_{jet}^2 . \quad (1.22)$$

Neuendorf и Wygnanski дали классификацию зон коандовских течений: пограничный слой на криволинейной поверхности; слой смешения на противоположном крае потока; центральная часть струи потока, которая практически не влияет на пограничный слой и слой смешения вследствие своей невязкой и безвихревой структуры.

Для полноты обзора по двумерным коандовским течениям также отметим эксперименты в сверхзвуковых характеристиках, основоположниками таких исследований считаются Bevilaqua и Lee [128], Gregory-Smith [129-130], Gilchrist [130], Hawkins [121], Cornelius и Lucius [122], Carpenter [131] и др.

Первые эксперименты с трехмерным коандовским течением были проведены Patankar и Sridhar [119], которые исследовали трехмерные эффекты турбулентных, несжимаемых, искривленных пристеночных струй. Экспериментальная установка была аналогична установке, представленной на рисунке 1.10, однако введена координата z для ограничения размера струи (рисунок 1.13). Patankar и Sridhar изменяя пропорции сопла (15.6, 10.0, 5.0, 2.5 и 1.0), сохраняли площадь сопла и начальную скорость постоянной. Коэффициент сжатия был определен Patankar как длина d к ширине b сопла. При проведении эксперимента радиус кривизны a изменялся. Одно из главных сделанных наблюдений заключалось в том, что при использовании прямоугольного потока угол отрыва был значительно сокращен, по сравнению с двумерным вариантом. Как соотношение сторон, так и радиус продемонстрировали большое влияние на значение угла отрыва. Наиболее влияющим параметром является соотношение сторон. Установлено, что угол

разделения увеличивается как с соотношением сторон, так и с радиусом кривизны. Rask [120] в своей работе подтвердил результаты исследований Patankar и Sridhar.

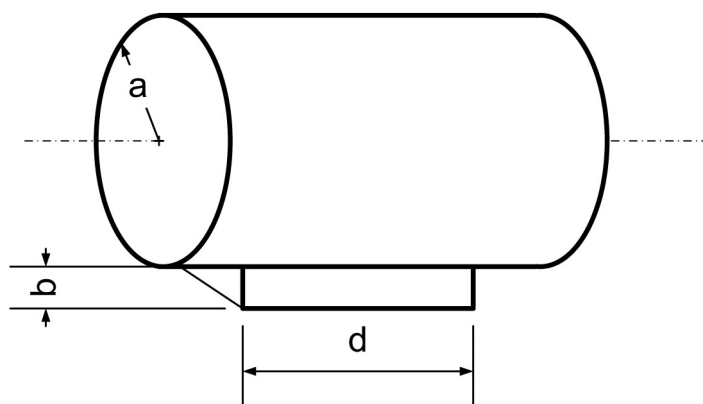


Рисунок 1.13. Схема экспериментальной установки, используемой Patankar

Juvet [132] провел исследование на осесимметричной струе, формируемой окружным соплом, при этом первичный поток, выходит из сопла большого диаметра D с центром в торе, а вторичный поток – по окружности, касательной к криволинейной поверхности ($D \gg b$, см. рисунок 1.14). Juvet проводил эксперимент с постоянными соотношением $b / a = 0.031$, коэффициент обдува – отношение объемного расхода вторичного потока к расходу первичного потока изменялся от 0 до 0.15, что соответствует значениям коэффициента импульса между 0.0 и 0.33. Соответственно при нулевом расходе вторичного потока коандовского течения не наблюдалось, при увеличении расхода налипание струи происходило более интенсивно.

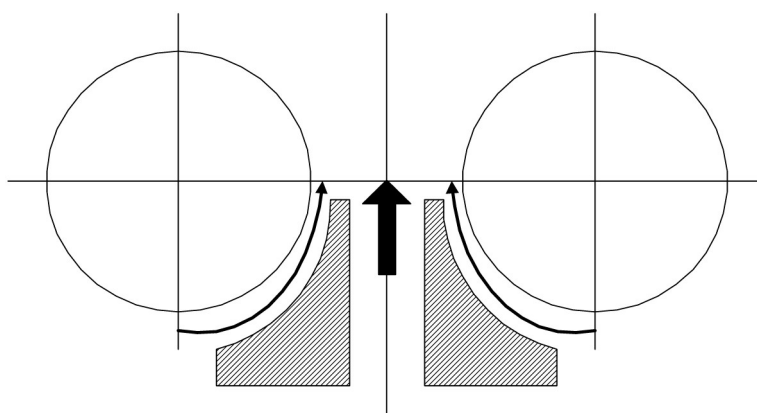


Рисунок 1.14. Схема экспериментальной установки Juvet

В качестве отечественных исследователей эффекта Коанда следует отметить коллектив ученых ЦАГИ: Гиневским А.С., Сыч. В.М. и др. разработан

интегральный метод расчета пристенных турбулентных струй, распространяющихся в спутном потоке [133], исследованы течения у криволинейных поверхностей [134-136]. Сычевым В.В., Петровым, А.В., Шеломовской В.В. рассмотрены способы управления пограничным слоем для предотвращения отрыва потока [137-138]. Эффект Коанда экспериментально исследован Соколовой И.Н. в работе [139] установлены зависимости отрыва потока при различных начальных давлениях, геометрических размерах струй и расстояний между соплом и криволинейной поверхностью, обнаружены гистерезисные явления в поведении коандовских течений. В работе [140] исследована возможность использования эффекта для уменьшения воздействия струи на преграду, приведены исследования поведения коандовских течений при экстремальных условиях: сверхзвуковых скоростях [141], при нагревании до 600 °С [142], отмечено, что и горячие коандовские струи обладают определенной автомоделностью.

Ганич Г.А., Гущина Н.А., Жулев Ю.Г. провели серию экспериментов для изучения зависимости степени проявления прямоугольных коандовских течений от геометрических параметров сопла и от угла выдува струи к плоской поверхности [143]. Интенсификацией эффекта Коанда для струй из осесимметричных сопел путем создания продольных вихрей занимались Жулев Ю.Г., Макаров В.А., Наливайко А.Г. [144-146].

Исследованиям распространения струи по криволинейной поверхности также посвящены труды Акатнова В.И. [147-148].

Таким образом, использование эффекта Коанда позволяет повысить эффективность вентиляционных сетей за счет снижения концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе. Приведенные конструкции обеспыливающих аппаратов используются на предприятиях по производству строительных материалов для пылеочистки.

1.4. Выводы к главе 1

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

1. Применение комплекса герметичных бункеров, систем пневмотранспорта и обеспыливающей вентиляции для хранения порошкообразных материалов имеет место в современном производстве, является экологичным, эффективным и актуальным техническим решением.

2. Повышению эффективности системы аспирации способствует снижение концентрации материала в аспирационном воздухе, что обеспечивает снижение запыленности на рабочих местах в цехах, а также пылевой нагрузки на обеспыливающий аппарат и энергопотребление системы вентиляции.

3. При загрузке бункеров главным фактором пылеобразования является взаимодействие пневмотранспортной струи материала с преградой (удар о дно бункера или слой ранее складированного (уложенного) материала и т.д.).

4. Предложен способ снижения пылеобразования при загрузке материалов в бункер, а, соответственно, и снижение концентрации материала в аспирационном воздухе, заключающийся во включении в аэродинамическую схему загрузочного узла эффект Коанда, обеспечивающего отклонение струи воздушного потока.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В БУНКЕРАХ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ ЗАГРУЗКЕ

Процесс заполнения бункера порошкообразным материалом в значительной степени определяется поведением отдельных частиц. В данном случае траектория движения зависит от их крупности, и аэродинамического поля скоростей воздуха в полости бункера, а также начальных условий выпуска двухкомпонентной смеси «твердая частица - воздух» из загрузочных патрубков пневмотранспортной системы.

Характерными особенностями выпуска этой смеси являются значительная скорость компонентов (15-25 м/с) и струйный характер течения несущей среды - воздуха. Учитывая значительные габариты цементных силосов (до 8-15 м в диаметре), это течение будем отождествлять со свободными струями.

2.1. Основные уравнения динамики частиц

2.1.1. Силы, действующие на частицу

При определении траекторий движения частиц учтено действие двух внешних сил: аэродинамические силы и силы тяжести:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{P} + \vec{A}, \quad (2.1)$$

где \vec{v} - вектор скорости частиц (м/с), $m = \frac{\pi d_{\text{э}}^3}{6} \rho_{\text{ч}}$ - масса частицы (кг),

$d_{\text{э}}$ - эквивалентный диаметр частицы (м), $\rho_{\text{ч}}$ - плотность частицы (кг/м³).

Сила тяжести определяется вектором:

$$\vec{P} = m \vec{g}, \quad (2.2)$$

где \vec{g} - вектор ускорения силы тяжести (м²/с), в расчетах принято $g = 9.81 \text{ м}^2/\text{с}$.

Аэродинамическая сила зависит от формы и размеров частицы и является функцией относительной скорости несущей среды:

$$\vec{A} = \psi F_{\text{м}} \frac{|\vec{u} - \vec{v}|(\vec{u} - \vec{v})}{2} \rho, \quad (2.3)$$

где \vec{u} - вектор скорости несущей среды (воздуха) (м/с), ρ - плотность воздуха

(кг/м³), $F_M = \frac{\pi d_p^2}{4}$ - площадь миделева сечения частицы (м²), ψ - коэффициент лобового сопротивления частицы, зависящий от её геометрической частицы и числа Рейнольдса.

Для частиц, полученных в результате дробления (так называемые «острозернистые» частицы) широкое распространение (например, при расчете аспирационных систем) получила двучленная формула озееновского типа [2]:

$$\psi = \frac{24}{Re} + \psi_0, \quad (2.4)$$

где ψ_0 - коэффициент лобового сопротивления в области автомодельности ($\psi_0 = 1,8$ для острозернистых частиц, $\psi_0 = 1 \div 1,5$ - для округлых частиц), Re - число Рейнольдса, в данном случае равное

$$Re = \frac{|\vec{u} - \vec{v}| \rho d_p}{\mu}, \quad (2.5)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости воздуха (Па·с).

Для тонких частиц цемента ($d_p < 15$ мкм) и $Re \leq 1$, коэффициент лобового сопротивления

$$\psi = \frac{24}{Re}, \quad (2.6)$$

и аэродинамическая сила линейно зависит от относительной скорости:

$$\vec{A} = 3\pi\mu d_p (\vec{u} - \vec{v}), \quad (2.7)$$

т.е. определяется формулой Стокса, которая упрощает интегрирование уравнений динамики. Например, в неподвижном воздухе ($\vec{u} = 0$), уравнение (2.1) можно представить в виде:

$$\int_{\vec{v}_0}^{\vec{v}} \frac{d\vec{v}}{\vec{g} - k\vec{v}} = \int_0^t \frac{dt}{m}, \quad (2.8)$$

откуда найдем соотношение для изменения вектора скорости падения частицы во времени t (сек.):

$$\vec{v} = \vec{v}_0 e^{-kt} + \frac{\vec{g}}{k}(1 - e^{-kt}), \quad (2.9)$$

где

$$k = \frac{3\pi\mu d_\vartheta}{m}, \quad (2.10)$$

\vec{v}_0 - вектор скорости частицы в начальный момент времени.

2.1.2. Уравнения динамики

В общем случае для определения траектории частиц перенесем векторное равенство на координатные оси выбранной системы координат. Для этого мы будем использовать цилиндрические оси координат x, y, φ , причем полярные координаты точек: y, φ лежат в горизонтальной плоскости, перпендикулярно направленной вниз вертикальной оси $0x$ (рисунок 2.1).

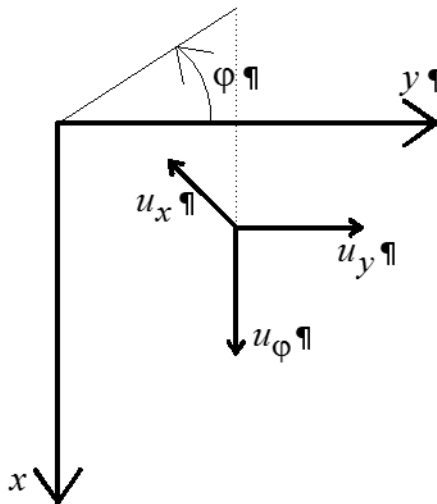


Рисунок 2.1. Координатные оси

В этом случае проекция векторного уравнения (2.1) для тонких частиц примет вид:

$$m \frac{dv_y}{dt} = 3\pi\mu d_\vartheta (u_y - v_y), \quad (2.11)$$

$$m \frac{dv_\varphi}{dt} = 3\pi\mu d_\vartheta (u_\varphi - v_\varphi), \quad (2.12)$$

$$m \frac{dv_x}{dt} = mg + 3\pi\mu d_\vartheta (u_x - v_x), \quad (2.13)$$

или, учитывая стационарный характер падения частиц:

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} - y\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2, \quad (2.14)$$

$$\frac{dv_\varphi}{dt} = y\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\frac{dy}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2.15)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (2.16)$$

$$v_y = \frac{dy}{dt}, \quad (2.17)$$

$$v_\varphi = y\frac{d\varphi}{dt}, \quad (2.18)$$

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad (2.19)$$

имеем следующую систему трех дифференциальных уравнений второго порядка:

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = m y \frac{d\varphi}{dt} + 3\pi\mu d_\vartheta \left(u_y - \frac{dy}{dt} \right), \quad (2.20)$$

$$m y \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -2m \frac{dy}{dt} + 3\pi\mu d_\vartheta \left(u_\varphi - y \frac{d\varphi}{dt} \right), \quad (2.21)$$

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = mg + 3\pi\mu d_\vartheta \left(u_x - \frac{dx}{dt} \right). \quad (2.22)$$

Здесь v_y , v_φ и v_x - проекции вектора скорости частицы, соответственно на ось Oy (радиальная составляющая скорости), на перпендикуляр к оси Oy (окружная скорость) и на вертикальную ось Ox (скорость вертикального перемещения частицы); u_y , u_φ и u_x - соответствующие проекции вектора скорости воздуха. В правой части системы уравнений (2.20) - (2.22) первые члены представляют собой центробежную, кориолисову силы и силу тяжести.

Из-за нелинейности система уравнений (2.20) - (2.22) чаще всего неразрешима в квадратурах, её исследование возможно лишь численными методами. Для сокращения числа переменных чаще всего используется безразмерная форма уравнений динамики, причем, как правило интегрируется

система дифференциальных уравнений первого порядка. В нашем случае (при цилиндрической системе координат и стационарной динамике воздуха и её частицы) систему уравнений второго порядка (2.20) - (2.22) можно представить в виде:

$$\frac{dx}{dt} = v_x, \quad (2.23)$$

$$\frac{dy}{dt} = v_y, \quad (2.24)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{v_\varphi}{y} = \omega_\varphi, \quad (2.25)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = g + k(u_x - v_x), \quad (2.26)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = y\omega_\varphi^2 + k(u_y - v_y), \quad (2.27)$$

$$\frac{d\omega_\varphi}{dt} = -2u_y \frac{w_\varphi}{y} + \frac{k}{y}(u_\varphi - y\omega_\varphi), \quad (2.28)$$

где ω_φ - угловая составляющая скорости частицы, рад/с.

Иногда используется каноническая форма записи системы уравнений динамики:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, t). \quad (2.29)$$

Запишем в канонической форме систему уравнений (2.23) – (2.28) в безразмерных величинах, для этого, применяя произвольную систему базовых параметров: характерную длину – l_∞ , скорость – u_∞ , время – $\tau_\infty = l_\infty / u_\infty$, введем следующую систему безразмерных величин:

$$x_1 = \frac{x}{l_\infty}; \quad x_2 = \frac{y}{l_\infty}; \quad x_3 = \varphi, \quad (2.30)$$

$$x_4 = \frac{v_x}{u_\infty}; \quad x_5 = \frac{v_y}{u_\infty}; \quad x_6 = \frac{d\varphi}{dt} \tau_\infty; \quad \tau = \frac{t}{l_\infty} u_\infty. \quad (2.31)$$

Тогда получим:

$$\dot{x}_1 = x_4; \quad \dot{x}_2 = x_5; \quad \dot{x}_3 = x_6, \quad (2.32)$$

$$\dot{x}_4 = Fr + \frac{1}{St} \left(\frac{u_x}{u_\infty} - x_4 \right), \quad (2.33)$$

$$\dot{x}_5 = x_2 x_6^2 + \frac{1}{St} \left(\frac{u_y}{u_\infty} - x_5 \right), \quad (2.34)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{x_2} \left(-2 x_2 x_6 + \frac{1}{St} \left(\frac{u_\varphi}{u_\infty} - x_2 x_6 \right) \right). \quad (2.35)$$

Здесь точка над величинами обозначает производную по безразмерной величине τ_∞ ; Fr – число Фруда, учитывающее действие сил тяжести:

$$Fr = \frac{g l_\infty}{u_\infty^2}, \quad (2.36)$$

St – число Стокса, учитывающее действие аэродинамических сил:

$$St = \frac{u_\infty}{k l_\infty} = \frac{d_0^2 \rho_\mu u_\infty}{18 \mu l_\infty}, \quad (2.37)$$

$\frac{u_x}{u_\infty}$, $\frac{u_y}{u_\infty}$, $\frac{u_\varphi}{u_\infty}$ – безразмерные составляющие струйного течения, которые должны

быть заданы функциями безразмерных координат x_1 , x_2 , x_3 .

2.1.3. Определение начальных условий

При формулировании начальных условий параметров для описания поля скоростей струйных течений воздуха, как правило, в качестве характерной длины принимается размер выпускного отверстия (для круглого – диаметр, для щелевидного отверстия, в случае плоской и веерной струи – высота щели b_0) [139], а в качестве характерной скорости – средняя по расходу скорость воздуха в выпускном отверстии (u_0). Естественно, в этом случае, характерным временем является:

$$\tau_\infty = \frac{d_0}{u_0}; \quad \text{или} \quad \tau_\infty = \frac{b_0}{u_0}. \quad (2.38)$$

Для анализа траекторий частиц во всем бункере (с целью выбора

рациональной схемы укладки складываемого материала) целесообразно в качестве характерной длины принимать либо диаметр бункера D (м) или его глубину $H_б$ (м). В этом случае в качестве характерного времени будет выступать:

$$\tau_{\infty} = \frac{D}{u_0}; \text{ или } \tau_{\infty} = \frac{H}{u_0}, \quad (2.39)$$

имеющий некоторый физический смысл, а именно, в последнем случае, указывает на порядок времени падения частиц на всю глубину бункера.

В качестве начальных условий (при $\tau = \frac{t}{\tau_{\infty}} = 0$) будем принимать:

для начальных точек траекторий:

$$x_1(0) = \frac{x}{l_{\infty}} = 0, \quad (2.40)$$

$$x_2(0) = \frac{y_0}{l_{\infty}} = a \neq 0, \quad (2.41)$$

например, $0 < y \leq d_0 / 2$ для круглого патрубка;

$$x_3(0) = \varphi = 0, \quad (2.42)$$

для конечных точек траекторий (максимальные значения):

$$x_1(\tau_k) = \frac{H}{l_{\infty}}; \text{ или } x_1(\tau_k) = \frac{D}{2 \cdot l_{\infty}}, \quad (2.43)$$

$$x_2(\tau_k) \leq \frac{D}{2 \cdot l_{\infty}}, \quad (2.44)$$

для составляющих начальных скоростей частиц:

$$x_4(0) = \frac{v_x(0)}{u_0} \geq 1; \quad (2.45)$$

$$x_5(0) = \frac{v_y(0)}{u_0} = 0; \quad (2.46)$$

$$x_2(0) \cdot x_6(0) \geq \frac{u_{\varphi}}{u_0}. \quad (2.47)$$

Эти условия будут корректироваться с учетом характера поля скоростей и

схемы загрузки бункера.

2.2. Поле скоростей воздуха при различном конструктивном исполнении загрузочных патрубков

Несмотря на широкий круг работ по струйным течениям [149-156], в большинстве из них главное внимание уделяется структуре и интегральным параметрам струй. Что касается поля скоростей, то подавляющее количество работ посвящены изучению изменения продольной составляющей скорости [149-153, 156]. Нас же интересуют все составляющие вектора скорости в струе, в том числе и величина «малой» поперечной составляющей. Несмотря на ее малость, допускаемой в теории струй как характерный случай пограничного слоя, она может оказывать заметное отклонение частиц в горизонтальном отклонении. Особенно когда из внешних сил, действующих на частицы, остается лишь аэродинамическая сила.

Потому для определения поля скоростей мы основывались на классических решениях автомодельных движений в турбулентных струях, используя которые имеется возможность определить поля скоростей в достаточно больших областях движения частиц.

2.2.1. Осесимметричная свободная струя

Используя классические построения уравнений пограничного слоя из уравнений Навье-Стокса [151], рассмотрим динамику свободных струйных течений в полости бункеров силосного типа для складирования порошкообразных сыпучих материалов. Исходные уравнения пограничного слоя в слабозакрученных воздушных изотермических струях запишем в цилиндрической системе координат x, y, φ (рисунок 2.2):

$$\frac{\partial}{\partial x}(yu_x) + \frac{\partial}{\partial y}(yu_y) = 0. \quad (2.48)$$

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\nu_T}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right); \quad \frac{\rho \omega_\varphi^2}{y} = \frac{\partial P}{\partial y}; \quad (2.49)$$

$$u_x \frac{\partial u_\varphi}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_\varphi}{\partial y} + \frac{u_\varphi \omega_\varphi}{y} = v_T \left\{ \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \frac{\partial u_\varphi}{\partial y} \right) - \frac{u_\varphi}{y^2} \right\}; \quad (2.50)$$

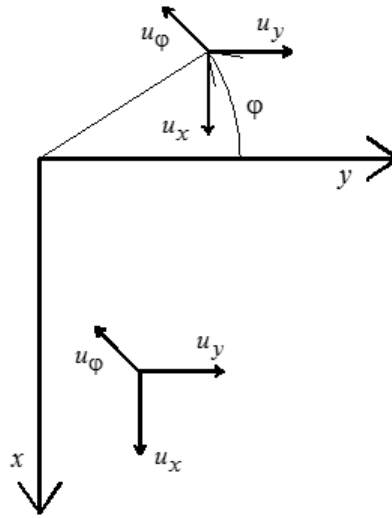


Рисунок 2.2. Оси координат для расчета осесимметричной свободной струи

Граничные условия:

$$u_y(x, 0) = 0; \quad u_\varphi(x, 0) = 0; \quad \left. \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad (2.51)$$

$$u_x(x, \infty) = 0; \quad u_\varphi(x, \infty) = 0; \quad P(x, \infty) = P_\infty. \quad (2.52)$$

Для осуществления перевода исходной системы уравнений в частных производных (уравнений (2.48)-(2.50)) к системе дифференциальных уравнений в обычных производных введены следующие формулы преобразования (штрих над функцией означает производные по независимой переменной $\eta = Bux^\beta$):

$$\frac{u_x}{u_{xm}} = \frac{F'(\eta)}{\eta}; \quad \frac{u_\varphi}{u_{\varphi m}} = \Phi(\eta); \quad \frac{P - P_\infty}{P_m - P_\infty} = P(\eta); \quad (2.53)$$

$$u_{xm} = Ax^\alpha; \quad u_{\varphi m} = Cx^\varepsilon; \quad P_m - P_\infty = \rho D x^\delta; \quad (2.54)$$

$$\eta = Bux^\beta; \quad \left(y = \frac{\eta}{Bx^\beta}; \quad \frac{\partial \eta}{\partial x} = \beta Bux^{\beta-1}; \quad \frac{\partial \eta}{\partial y} = Bx^\beta \right), \quad (2.55)$$

где u_{xm} и $u_{\varphi m}$ - продольная и окружная составляющие скорости на оси струи, м/с;

P_m - избыточное давление на оси струи, Па; ρ - плотность воздуха, кг/м³,

$\alpha, \beta, \varepsilon, \delta, A, B, C, D$ - константы автомодельности.

Для того чтобы преобразовать систему (2.48)-(2.50), найдем все члены этих уравнений, как функции новой независимой переменной:

$$u_x = Ax^\alpha \frac{F'}{\eta}; \quad \frac{\partial u_x}{\partial x} = Ax^{\alpha-1} \left[\alpha \frac{F'}{\eta} + \beta \eta \left(\frac{F'}{\eta} \right)' \right]; \quad \frac{\partial u_x}{\partial y} = ABx^{\alpha+\beta} \left(\frac{F'}{\eta} \right)';$$

Из уравнения (2.50):

$$u_y = -\frac{1}{y} \int_0^y \frac{\partial}{\partial x} (yu_x) dy = -\frac{A}{B} x^{\alpha-\beta-1} \left[(\alpha-2\beta) \frac{F}{\eta} + \beta F' \right]; \quad u_\varphi = C x^\varepsilon \Phi(\eta);$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial x} = C x^{\varepsilon-1} [\varepsilon \Phi + \beta \eta \Phi']; \quad \frac{\partial u_\varphi}{\partial y} = C B^2 x^{\varepsilon+2\beta} \cdot \frac{1}{\eta} (\eta \Phi)';$$

Константы автомодельности:

$$\alpha = -1; \quad \beta = -1; \quad \varepsilon = -2; \quad \delta = -4; \quad k = c^2; \quad (2.56)$$

$$A = \sqrt{\frac{3I_x}{8\pi r a^2}}; \quad B = \frac{1}{a} \approx \frac{1}{\sqrt{k}}; \quad C = \frac{3M_x}{32\pi r a^2} \sqrt{\frac{8\pi r}{3I_x}}; \quad D = \frac{M_x^2}{32\pi r a^4 I_x}, \quad (2.57)$$

$$I_x = 2\pi \int_0^\infty \rho u_x^2 y dy = const, \quad (2.58)$$

$$M_x = 2\pi \int_0^\infty \rho u_x u_\varphi y^2 dy = const. \quad (2.59)$$

Уравнения автомодельного движения:

$$F'' - \frac{F'}{\eta} + \left(\frac{FF'}{\eta} \right)' = 0; \quad P' = \frac{\Phi^2}{\eta}; \quad \Phi'' + \frac{1+F}{\eta} \Phi' + \frac{\eta F' + F - 1}{\eta^2} \Phi = 0, \quad (2.60)$$

$$\left. \frac{F'}{\eta} \right|_{\eta=0} = 1; \quad \left. \frac{F}{\eta} \right|_{\eta=0} = 0; \quad \Phi(0) = 0; \quad \left. \frac{F'}{\eta} \right|_{\eta=\infty} = 0; \quad \Phi(\infty) = 0; \quad P(\infty) = 0. \quad (2.61)$$

$$\varphi_{1/2} = 1.82$$

Решение этой системы автомодельных уравнений имеет вид:

$$F(\eta) = \frac{0,5\eta^2}{1+0,125\eta^2}; \quad F'(\eta) = \frac{\eta}{(1+0,125\eta^2)^2}; \quad (2.62)$$

$$\Phi(\eta) = \frac{\eta}{(1 + 0,125\eta^2)^2}; \quad (2.63)$$

$$P(\eta) = \frac{1}{(1 + 0,125\eta^2)^3}. \quad (2.64)$$

Используя эти соотношения найдем расчетные формулы для составляющих вектора скорости воздуха в осесимметричной слабозакрученной струе:

Для продольной составляющей в силу (2.53) и (2.54) имеем:

$$u = Ax^{-1} \frac{F'(\eta)}{\eta}, \quad (2.65)$$

или, определив начальный импульс,

$$I_x = 2\pi r_{x0}^2 \frac{r_0^2}{2} = \pi r_0^2 \rho u_{x0}^2 = \frac{\pi d_0^2}{4} \rho u_{x0}^2, \quad (2.66)$$

и параметр

$$A = \sqrt{\frac{3\pi d_0^2 \rho u_{x0}^2}{8 \cdot 4\pi a^2}} = \sqrt{\frac{3}{32}} \frac{d_0 u_{x0}}{a}, \quad (2.67)$$

получим соотношение для определения продольной скорости (с учетом второго уравнения (2.62)):

$$\frac{u_x}{u_{x0}} = K_{u_x} \frac{F'(\eta)}{\bar{x}\eta}, \quad K_{u_x} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{3}{32}}, \quad \eta = \frac{\bar{y}}{a\bar{x}}, \quad (2.68)$$

где d_0 – диаметр патрубка (начального сечения струи), м; u_{x0} – скорость воздуха на выходе из патрубка, м/с; $\bar{x} = x/d_0$; $\bar{y} = y/d_0$ – безразмерные координаты; a – экспериментальный коэффициент, учитывающий «турбулентную» структуру струи [149, 15] (принимаемый при расчете $a = 0,05$).

Чтобы найти продольную составляющую проинтегрируем уравнение неразрывности (2.50):

$$u_y = -\frac{1}{y} \int_0^y \frac{\partial u_x}{\partial x} dy. \quad (2.69)$$

Или, имея в виду формулы преобразования (2.53)-(2.55), запишем:

$$\frac{\partial u_{xy}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Ay}{x} \frac{F'(\eta)}{\eta} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{B} F'(\eta) \right) = \frac{A}{B} F''(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x};$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = By\beta x^{\beta-1} = \eta \frac{\beta}{x};$$

$$y = \frac{\eta}{Bx^\beta}; \quad dy = \frac{d\eta}{Bx^\beta}.$$

Подставляя полученные преобразования в (2.69), имеем:

$$u_y = -\frac{1}{y} \int \frac{A}{B} F'' \eta \frac{\beta}{x} \frac{d\eta}{Bx^\beta} = \frac{A}{yB^2} \int F'' \eta d\eta. \quad (2.70)$$

Исходя из последнего уравнения и в силу (2.50), получим следующее уравнение:

$$F'' = \left(\frac{\eta}{(1+0,125\eta^2)^2} \right)' = \frac{(1+0,125\eta^2)^2 - \eta(2(1+0,125\eta^2) \cdot 0,5\eta)}{[(1+0,125\eta^2)^2]^2} =$$

$$= \frac{1+0,125\eta^2 - \eta^2}{(1+0,125\eta^2)^3} = \frac{1-0,875\eta^2}{(1+0,125\eta^2)^3}.$$

Интегрируя которое, найдем:

$$f(\eta) = \int_0^\eta \frac{1-0,875\eta^2 \cdot \eta d\eta}{(1+0,125\eta^2)^3} = \left. \begin{cases} 1+0,125\eta^2 = z; \\ \eta^2 = \frac{z-1}{0,125} : 8(z-1). \end{cases} \right\} = 4 \int_1^z \frac{1-0,875 \cdot 8(z-1)}{z^3} dz =$$

$$= 4 \int_1^z \frac{8-7z}{z^3} dz = 4 \int_1^z (8z^{-3} - 7z^{-2}) dz = 2 \left[\frac{7}{z} - \frac{1}{z^2} - 3 \right].$$

Таким образом расчетное соотношение (2.70) для скорости воздуха в струе с учетом (2.57) и (2.67):

$$u_y = \sqrt{\frac{3}{32}} \frac{d_0 u_{x0}}{a \frac{1}{a^2}} \frac{2}{y} \left[\frac{7}{z} - \frac{1}{z^2} - 3 \right], \quad (2.71)$$

где $z = 1 + \frac{1}{8}\eta^2$; $\eta = \frac{\bar{y}}{a\bar{x}}$; $\bar{x} = \frac{x}{d_0}$; $\bar{y} = \frac{y}{a}$;

или

$$\frac{u_y}{u_{x0}} = K_y \frac{1}{\bar{y}} \left(\frac{7}{z} - \frac{1}{z^2} - 3 \right); \quad (2.72)$$

где

$$K_y = \frac{2a}{3} \sqrt{\frac{3}{32}}. \quad (2.73)$$

Для окружной скорости в силу (2.53) и (2.54), имеем

$$u_\varphi = C \frac{\Phi(\eta)}{x^2}$$

или определив поток момента количества движения относительно оси ОХ:

$$M_x = 2\pi r u_{x0} u_{\varphi 0} \frac{r_0^2}{3} = 2\pi r u_{x0} u_{\varphi 0} \frac{d_0^3}{24} \quad (2.74)$$

и параметр

$$C = \frac{3 \cdot 2\pi r u_{x0} u_{\varphi 0} d_0^3}{32\pi r a^2 \cdot 24} \sqrt{\frac{8\pi r}{3 \frac{\pi}{4} d_0^2 r u_{x0}^2}} = u_0 d_0^2 K_\varphi, \quad (2.75)$$

где

$$K_\varphi = \frac{1}{24a^2} \sqrt{\frac{3}{32}} \quad (2.76)$$

найдем окружную скорость струи (с учетом (2.63)):

$$\frac{u_\varphi}{u_0} = K_\varphi \frac{\Phi(\eta)}{(\bar{x})^2}. \quad (2.77)$$

2.2.2. Плоская струя

Исходные уравнения пограничного слоя плоских струй запишем в цилиндрической системе координат x, y, φ (рисунок 2.3):

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial u_x}{\partial y} \right); \quad \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0, \quad (2.78)$$

где ν_T - коэффициент турбулентного обмена:

$$\nu_T = K \cdot Ax^{\alpha-\beta} \approx x^{0,5}. \quad (2.79)$$

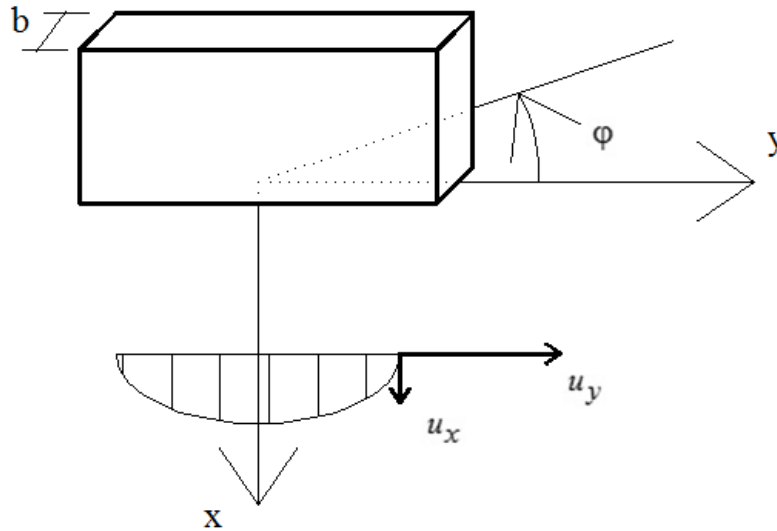


Рисунок 2.3. Оси координат для расчета плоской струи

Граничные условия:

$$u_y(x, 0) = 0; \quad \left. \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad u_x(x, \pm\infty) = 0. \quad (2.80)$$

Поскольку в условиях плоской струи на оси симметрии ($y=0$) $u_m = u_x$, т.е. формулы преобразования имеют вид:

$$\frac{u_x}{u_m} = F'(\eta), \quad u_m = Ax^\alpha, \quad \eta = Bux^\beta, \quad B = \frac{1}{a}; \quad (2.81)$$

Константы автомодельности

$$\alpha = -\frac{1}{2}; \quad \beta = -1; \quad (2.82)$$

$$A = \sqrt{\frac{3I_x}{8\rho\sqrt{K}}}; \quad B = \frac{1}{2\sqrt{K}} = \frac{1}{a}; \quad K = \frac{a^2}{4}, \quad (2.83)$$

где a – коэффициент «турбулентной структуры» плоской струи (в расчетах для условий пневмотранспортной загрузки $a = 0,16$) [3] [4],

$$I_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho u_x^2 dy = const = \rho u_{x0}^2 b_0, \quad (2.84)$$

где b_0 – ширина щели патрубке, м; u_0 – скорость воздуха в патрубке, м/с.

Уравнение автомодельного движения для случая плоской струи:

$$F''' + 2(FF')' = 0, \quad (2.85)$$

$$F(0) = 0, \quad F'(0) = 1, \quad F'(\pm\infty) = 0, \quad (2.86)$$

$$\eta_{1/2} = 0,88. \quad (2.87)$$

Решение

$$F = th\eta; \quad F' = 1 - th^2\eta; \quad \text{или} \quad F' = 1 - F^2. \quad (2.88)$$

Поле скоростей

$$u_x = Ax^{-\frac{1}{2}}F' = Ax^{-\frac{1}{2}}(1 - F^2) = Ax^{-\frac{1}{2}}(1 - th^2\eta); \quad (2.89)$$

$$u_y = \frac{A}{B\sqrt{x}}th\eta\left(\frac{1}{2} - th\eta\right). \quad (2.90)$$

Здесь u_y найдена из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0; \quad u_y = -\int_0^y \frac{\partial u_x}{\partial x} dy.$$

Т.к.

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = A \frac{\partial}{\partial x} (x^{-1/2} F') = A \left\{ \left(-\frac{1}{2} x^{-3/2} \right) F' + x^{-1/2} F'' \frac{\partial \eta}{\partial x} \right\},$$

а

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = B y \beta x^{\beta-1} = -1 B \frac{y}{x} x^{-1} = -\eta x^{-1}; \quad y = \frac{\eta}{B x^{-1}} = \frac{x}{B} \eta; \quad dy = \frac{x}{B} d\eta,$$

имеем

$$\begin{aligned} u_x &= -\int_0^{\eta} A \left\{ \left(-\frac{1}{2} x^{-3/2} \right) F' - x^{-3/2} F'' \right\} \frac{x}{B} d\eta = \int_0^{\eta} x^{-1/2} A \left(\frac{1}{2} F' + F'' \right) \frac{1}{B} d\eta = \\ &= x^{-1/2} \frac{A}{B} \int_0^{\eta} \left(\frac{1}{2} F' + F'' \right) d\eta = \frac{A}{B\sqrt{x}} \int_1^{\frac{1}{2}F+F'} d\left(\frac{1}{2} F' + F'' \right) = \\ &= \frac{A}{B\sqrt{x}} \left[\frac{1}{2} F' + F'' - 1 \right] = \frac{A}{B\sqrt{x}} \left[\frac{1}{2} th\eta + 1 - th^2\eta - 1 \right] = \frac{A}{B\sqrt{x}} th\eta \left[\frac{1}{2} - th\eta \right]. \end{aligned}$$

Расчетные формулы для поля скоростей в струе примут вид:

$$\bar{u}_x = K_{u_x} \frac{1 - th^2 \eta}{\sqrt{\bar{x}}}; \quad \bar{u}_y = K_{u_y} th \eta \left(\frac{1}{2} - th \eta \right); \quad \eta = \frac{\bar{y}}{a\bar{x}}, \quad (2.91)$$

где

$$\bar{u}_x = u_x / u_{x0}; \quad \bar{u}_y = u_y / u_{x0}, \quad (2.92)$$

$$\bar{x} = x / b_0; \quad \bar{y} = y / b_0; \quad (2.93)$$

$$K_{u_x} = \sqrt{\frac{3}{4a}}; \quad K_{u_y} = \sqrt{\frac{3a}{4}} = aK_{u_x}. \quad (2.94)$$

2.2.3. Вверная слабозакрученная струя

Течение, создаваемое вверной струей воздуха (в системе координат x, y, φ см. рисунок 2.4), истекающего во все стороны из линейного элемента малой длины Δu_0 в начале координат, симметрично, как и плоская струя относительно плоскости $y = 0$ и обладает осевой симметрией относительно оси Ox как и круглая струя.

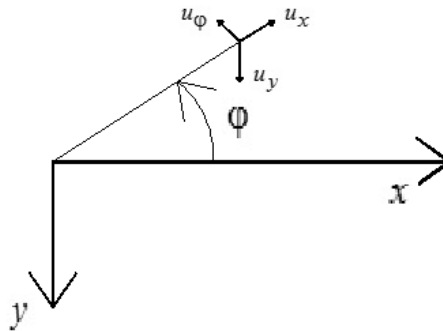


Рисунок 2.4. Оси координат для расчета вверной струи

Уравнения движения и неразрывности в приближении теории пограничного слоя, для изотермического случая, запишем в виде [151]:

$$\left. \begin{aligned} u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + v \frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{u_\varphi^2}{x} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \\ u_x \frac{\partial u_\varphi}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_\varphi}{\partial y} + \frac{u_x u_\varphi}{x} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x} (x u_x) + \frac{\partial}{\partial y} (x u_y) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.95)$$

где u_x, u_y, u_φ – продольная (вдоль оси Ox), вертикальная (вдоль оси Oy) и

окружная (по перпендикуляру к оси $0x$ в плоскости $y = const$) составляющие скорости воздуха в струе.

Граничные условия для системы (2.95) имеют вид:

$$\left. \begin{array}{l} u_y = 0, \quad \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial u_\varphi}{\partial y} = 0 \quad \text{при } y = 0 \\ u_x = u_\varphi = 0 \quad \quad \quad \text{при } y = \pm\infty \end{array} \right\}. \quad (2.96)$$

С целью получения однозначного решения задачи граничные условия дополним интегральными условиями.

Умножим первое уравнение системы (2.95) на x , а третье – на u_x , суммируем левые и правые части уравнений; после очевидных преобразований получим:

$$\frac{\partial}{\partial x}(xu_x^2) + \frac{\partial}{\partial y}(xu_x u_y) - u_\varphi^2 = \nu_T \frac{\partial^2}{\partial y^2}(xu_x),$$

интегрируя которое по y в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ с учетом граничных условий (2.96) имеем следующее интегральное уравнение:

$$\frac{d}{dx} \int_{-\infty}^{+\infty} xu_x^2 dy = \int_{-\infty}^{+\infty} u_\varphi^2 dy.$$

Или в случае незакрученной струи ($u_\varphi = 0$), импульс струи, сохраняет постоянное значение вдоль струи (по оси $0x$):

$$I_x = 2\pi x \int_{-\infty}^{+\infty} \rho u_x^2 dy = const. \quad (2.97)$$

Для слабозакрученных струй на значительном удалении от начала координат это соотношение сохраняет свое значение в качестве предельного. Справедливость этого допущения в работе [151] аргументируется разными законами изменения продольной u и окружной w скоростей удаления от начала координат:

$$u_x \sim \frac{1}{x}, \quad u_\varphi \sim \frac{1}{x^2}. \quad (2.98)$$

поэтому в первом уравнении системы (2.95) член $\frac{u_\Phi^2}{x} \sim \frac{1}{x^5}$, тогда как остальные члены будут пропорциональны $\frac{1}{x^3}$.

Для получения второго уравнения (для закрученной веерной струи) умножим второе уравнение системы (2.95) на x^2 и сложим его с уравнением неразрывности, предварительно умноженным на xu_Φ . После несложного преобразования (группировка частных производных величин в частные производные произведений) получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial x}(x^2 u_x u_\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(x^2 u_y u_\Phi) = v_T \frac{\partial^2}{\partial y^2}(x^2 u_\Phi),$$

интегрируя которое поперек струи, в пределах от $y = +\infty$, с учетом тех же граничных условий (2.96) найдем:

$$M_y = 2\pi x^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \rho u_x u_\Phi dy = const. \quad (2.99)$$

Это интегральное соотношение выражает закон сохранения в закрученной веерной струе потока момента количества движения относительно оси Oy .

Для определения поля скоростей воспользуемся методом аффинных преобразований системы координат, широко используемый не только в теории однородных струйных течений [149, 153] (как ламинарных, так и турбулентных), но и при оценке эффекта эжекции в струе падающих частиц [31].

Введем функции $F(\eta)$ и $\Phi(\eta)$, где η - независимая переменная при $B = \frac{1}{a}$; $\beta = -1$, и полагая что максимальные значения скоростей на оси Ox соответственно равны:

$$u_{xm} = Ax^\alpha; \quad u_{\Phi m} = Cx^\varepsilon. \quad (2.100)$$

Обозначим:

$$u_x = u_{xm} F_\eta'; \quad u_\varphi = u_{\varphi m} \Phi(\eta); \quad \eta = y B x^\beta. \quad (2.101)$$

Преобразуем все члены уравнений с помощью новой независимой переменной η (u_{xm} – значение скорости на оси струи $0x$; $u_{\varphi m}$ – максимальное значение окружной скорости; штрих и нижний индекс η здесь и далее означает обычное дифференцирование по новой независимой переменной):

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = F_\eta' \frac{\partial u_{xm}}{\partial x} + u_{xm} \frac{dF_\eta'}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = A x^{\alpha-1} (\alpha F_\eta' + \beta \eta F_\eta''); \quad (2.102)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = u_{xm} F_\eta'' \frac{\partial \eta}{\partial y} = A \cdot B x^{\alpha+\beta} F_\eta''; \quad (2.103)$$

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = A \cdot B x^{\alpha+\beta} F_\eta''' \frac{\partial \eta}{\partial y} = A \cdot B^2 x^{\alpha+2\beta} F_\eta'''; \quad (2.104)$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial x} = \Phi \frac{\partial u_{\varphi m}}{\partial x} + u_{\varphi m} \Phi_\eta' \frac{\partial \eta}{\partial x} = \Phi \left(\varepsilon x^{\varepsilon-1} + C x^\varepsilon \Phi_\eta' \frac{\beta}{x} \eta \right) = C x^{\varepsilon-1} (\varepsilon \Phi + \beta \eta \Phi_\eta'); \quad (2.105)$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial y} = u_{\varphi m} \Phi_\eta' \frac{\partial \eta}{\partial y} = B \cdot C x^{\beta+\varepsilon} \Phi_\eta'; \quad (2.106)$$

$$\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial y^2} = B^2 C x^{2\beta+\varepsilon} \Phi_\eta''. \quad (2.107)$$

Для завершения перевода системы (2.95) к новой переменной выразим вертикальную составляющую u_φ вектора скорости вверной струи. Воспользуемся уравнением неразрывности (третьим уравнением системы (2.95)):

или с учетом (2.101)-(2.102) и имея ввиду, что

$$y = \frac{\eta}{B x^\beta}; \quad dy = \frac{d\eta}{B x^\beta}; \quad (2.108)$$

получим:

$$u_y = -\frac{A}{B} x^{\alpha-\beta-1} \cdot \int_0^\eta \left[(1+\alpha) F_\eta' + \beta \eta F_\eta'' \right] d\eta = -\frac{A}{B} x^{\alpha-\beta-1} \left[(1+\alpha-\beta) F + \beta \eta F_\eta' \right]. \quad (2.109)$$

Подставляя полученные результаты в первое уравнение исходной системы (2.95), после очевидных упрощений получим:

$$\alpha(F'_\eta)^2 - (1 + \alpha - \beta)F''_\eta \cdot F = v_T \frac{B^2}{A} x^{2\beta - \alpha + 1} F'''_\eta. \quad (2.110)$$

С учетом требования об отсутствии в автомодельном уравнении явной функции прежних независимых переменных (в данном случае x), с учетом:

$$\beta = \frac{\alpha - 1}{2} \quad (2.111)$$

запишем уравнение (2.110) в виде:

$$v_T \frac{B^2}{A} F''' = \alpha(F')^2 - \frac{3 + \alpha}{2} FF''. \quad (2.112)$$

С учетом соотношений (2.101), (2.105) и (2.109) получим для второй неизвестной функции Φ следующее дифференциальное уравнение:

$$v_T \frac{B^2}{A} \Phi'' = (1 + \varepsilon)F'\Phi - \frac{3 + \alpha}{2} F\Phi'. \quad (2.113)$$

Для определения констант α , β и ε воспользуемся интегральными условиями (2.97), (2.99), которые с учетом (2.101) запишем в виде:

$$I_x = 2\pi x \int_{-\infty}^{+\infty} \rho \cdot A^2 x^{2\alpha} (F'_\eta)^2 \frac{d\eta}{Bx^\beta} = 2\pi x^{2\alpha - \beta + 1} \rho \frac{A^2}{B} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(F'_\eta)^2}{2} d\eta; \quad (2.114)$$

$$2\alpha - \beta + 1 = 0, \quad \beta = 2\alpha + 1; \quad (2.115)$$

$$\frac{A^2}{B} = \frac{I_x}{2\Pi\rho I_1}; \quad I_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} (F')^2 d\eta; \quad (2.116)$$

Аналогично раскрывая условие (2.99), получим:

$$M_y = 2\pi x^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \rho A x^\alpha F'_\eta C x^\varepsilon \Phi \frac{d\eta}{Bx^\beta} = 2\pi\rho \frac{A \cdot C}{B} x^{\alpha + \varepsilon - \beta + 2} \int_{-\infty}^{+\infty} F'_\eta \Phi d\eta, \quad (2.117)$$

откуда запишем

$$\varepsilon = \beta - \alpha - 2; \quad (2.118)$$

$$C = \frac{B}{A} \cdot \frac{M_y}{2\pi r I_2}; \quad I_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} F'_\eta \Phi d\eta. \quad (2.119)$$

Кроме того, пользуясь произвольностью значений постоянных A и B , полагается

$$\frac{A}{B^2} = 2\nu_T. \quad (2.120)$$

Совместное решение уравнений (2.111), (2.115) и (2.118) дает следующее значение констант автомодельности:

$$\alpha = -1; \quad \beta = -1; \quad \varepsilon = -2. \quad (2.121)$$

С учетом (2.119) и (2.110) система дифференциальных уравнений (2.112)-(2.113) намного упрощается (здесь и далее индекс η опущен):

$$F''' + (F')^2 + FF'' = F''' + 2(F \cdot F')' = 0; \quad (2.122)$$

$$\Phi'' + 2(F'\Phi + F\Phi') = \Phi'' + 2(F \cdot \Phi)' = 0, \quad (2.123)$$

а граничные условия (2.96) примут вид:

$$F = 0; \quad F'' = 0 \quad (F' = \text{const} = 1); \quad \Phi' = 0 \quad (\Phi = \text{const} = 1) \quad \text{при } \eta=0; \quad (2.124)$$

с учетом (2.101):

$$F' = 0; \quad \Phi = 0 \quad \text{при } \eta = \pm \infty. \quad (2.125)$$

Решение системы уравнений (2.122)-(2.123) при этих граничных условиях имеет вид:

$$F = th\eta; \quad F' = \frac{1}{ch^2\eta} = 1 - th^2\eta; \quad F' = \Phi. \quad (2.126)$$

Заметим, что в силу последнего равенства имеем:

$$I_1 = I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} (F')^2 d\eta = \frac{4}{3}. \quad (2.127)$$

Для турбулентного течения характер изменения поля скоростей описывается теми же функциями автомодельного течения, отличия лишь в значениях постоянных A , B и C :

$$A = \sqrt{\frac{3I_x}{8\pi\rho\sqrt{2K}}}; \quad B = \frac{1}{\sqrt{2K}} = \frac{1}{a}; \quad C = M_y \sqrt{\frac{3}{8\pi\rho I_x \sqrt{2K}}}, \quad (2.128)$$

где a – экспериментальный коэффициент, связанный с коэффициентом $K = a^2/2$.

Импульс I_x в силу (2.97) для веерной струи, истекающей из кольцевой щели высотой b_0 (м) со скоростью u_0 (м/с), вычисляется по формуле:

$$I_x = 2\pi r_0 \rho u_{x0}^2 b_0, \quad (2.129)$$

где r_0 – радиус кольцевой щели (расстояние от оси Oy до начального сечения струи), м.

A для момента количества движения, в силу (2.99):

$$M_y = 2\pi r_0^2 \rho u_{x0} u_{\varphi 0} b_0, \quad (2.130)$$

где $u_{\varphi 0} = u_{x0}/\operatorname{tg} \gamma$, γ – угол наклона вектора скорости выхода воздуха к касательной и кольцевой щели (при $\gamma = \frac{\pi}{2}$; $u_{\varphi 0} = 0$; $M_y = 0$, т.е. отсутствует закрутка веерной струи, а вектор скорости выхода равен u_{x0} , при $C = 0$).

Таким образом, расчетные формулы для определения поля скоростей в слабо закрученной турбулентной веерной струе имеют вид:

$$u_x = \sqrt{\frac{3}{4}} \frac{r_0 b_0}{ax^2} \frac{u_{x0}}{ch^2 \eta}, \quad \eta = \frac{y}{ax}; \quad (2.131)$$

$$u_y = -\sqrt{\frac{3a}{4}} \frac{r_0 b_0}{x^2} u_{x0} (F - \eta F') = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3a}{4}} \frac{r_0 b_0}{x^2} u_{x0} \frac{2\eta - sh 2\eta}{ch^2 \eta}; \quad (2.132)$$

$$u_{\varphi} = \sqrt{\frac{3}{4a}} \frac{r_0^3 b_0}{x^4} u_{\varphi 0} (1 - th^2 \eta) = \sqrt{\frac{3}{4a}} \frac{r_0^3 b_0}{x^4} \frac{u_{\varphi 0}}{ch^2 \eta}. \quad (2.133)$$

При этом единственно неизвестный коэффициент a определяется по формуле:

$$a = \frac{1}{\eta_{1/2}} \cdot \frac{y_{1/2}}{x_{1/2}}, \quad (2.134)$$

где $\eta_{1/2}$ – некоторое «половинное» значение соответствующее значению $u_x/u_{xm} = 0.5$; $x_{1/2}$; $y_{1/2}$ – значение координат точек, в которых $u_x/u_{xm} = 0.5$. Для плоских и веерных струй $\eta_{1/2} = 0.88$, для осесимметричных – $\eta_{1/2} = 1.8$. В этой работе приводятся ориентировочные данные для коэффициента a [149]: для плоской и веерной струи $a = 0,1 - 0,12$; для круглой струи $a = 0,045 - 0,055$. Учитывая, что в данном случае имеет место двухкомпонентная струя, то коэффициент a несколько выше, чем отмечалось ранее.

Таким образом, расчетные формулы для поля скоростей веерной струи в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \bar{u}_x &= \frac{K_{u_x}}{\bar{x}ch^2\eta}; \quad \bar{u}_y = \frac{K_{u_y}}{\bar{x}} \frac{\eta - 0,5sh(2\eta)}{ch^2\eta}; \quad \bar{u}_\varphi = \frac{K_{u_\varphi}}{(\bar{x})^2} \frac{1}{ch^2\eta}; \\ \eta &= \frac{\bar{y}}{a\bar{x}}, \quad \bar{u}_x = u_x/u_{x0}; \quad \bar{u}_y = u_y/u_{x0}; \quad \bar{u}_\varphi = u_\varphi/u_{x0}, \end{aligned} \quad (2.135)$$

где $\bar{x} = x/b_0$; $\bar{y} = y/b_0$; $\bar{r}_0 = r_0$; $K_{u_x} = \frac{\sqrt{3\bar{r}_0}}{4a}$; $K_{u_y} = \sqrt{\frac{3a\bar{r}_0}{4}} = aK_{u_x}$; $K_{u_\varphi} = K_{u_x} \frac{\bar{r}_0}{tg\gamma}$.

2.3. Траектории частиц в полости бункера при различных схемах пневмозагрузки

Рассмотрим динамику частиц в осесимметричной струе, которая формируется за счет завихрителя в вертикальном канале диаметром d_0 . Для интегрирования уравнения динамики частиц (2.32)-(2.35), используем поле скоростей, описываемое системой уравнений: (2.68), (2.72), (2.77). Перейдем к безразмерной форме этих уравнений, используя в качестве характерного геометрического размера диаметр бункера D_1 :

$$l_\infty = D_1; \quad (2.136)$$

скорости воздуха в патрубке:

$$u_{\infty} = u_0 = \frac{4Q}{\pi d_0^2}; \quad (2.137)$$

и времени

$$\tau_{\infty} = \frac{D_1}{u_0}. \quad (2.138)$$

Тогда поле безразмерных скоростей воздуха в струе будет описываться следующей системой уравнений:

$$\frac{u_x}{u_{\infty}} = \frac{u_x}{u_0} = \frac{A}{D_1 u_0 x_1} \cdot \frac{F'}{\eta}; \quad (2.139)$$

$$\frac{u_y}{u_{\infty}} = \frac{u_y}{u_0} = \frac{A}{D_1 u_0 x_1} \cdot \left(F' - \frac{F}{\eta} \right); \quad (2.140)$$

$$\frac{u_{\varphi}}{u_{\infty}} = \frac{u_{\varphi}}{u_0} = \frac{C}{D_1^2 u_0 x_1^2} \cdot \Phi; \quad \tau_{\infty} = \frac{D_1}{u_0}. \quad (2.141)$$

где $\eta = \frac{x_2}{a \cdot x_1}$; x_1 и x_2 – безразмерные координаты точки траектории частицы (x и y , отнесенные к диаметру бункера).

Постоянные коэффициенты в правых частях уравнений (2.139)-(2.141) обозначим:

$$A_1 = \frac{A}{D_1 u_0}; \quad A_2 = \frac{A \bar{a}}{D_1 u_0}; \quad A_3 = \frac{C}{D_1^2 u_0}, \quad (2.142)$$

где \bar{a} – функции, определяющие изменение безразмерных скоростей:

$$f_1 = \frac{F'}{\eta} = \frac{1}{z_1^2}; \quad (2.143)$$

где $z_1 = 1 + \frac{1}{8} \eta^2$;

$$f_2 = \frac{\frac{F'}{\eta} - \frac{F}{\eta}}{\frac{\eta}{z_1^2} - \frac{0,5\eta}{z_1}} = \frac{\eta}{z_1} \left(\frac{1}{z_1} - 0,5 \right); \quad (2.144)$$

$$f_3 = \Phi = F' = \frac{\eta}{z_1^2} = \eta f_1. \quad (2.145)$$

Тогда систему (2.139)-(2.141) перепишем в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_x}{u_0} &= \frac{A_1}{x_1} \cdot f_1; \\ \frac{u_y}{u_0} &= \frac{A_2}{x_1} \cdot f_2; \\ \frac{u_\varphi}{u_0} &= \frac{A_3}{x_1^2} \cdot f_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.146)$$

а уравнение траектории частиц:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_4; \quad \dot{x}_2 = x_5; \quad \dot{x}_3 = x_6; \\ \dot{x}_4 &= Fr + \frac{1}{St} \left(\frac{u_x}{u_\infty} - x_4 \right); \\ \dot{x}_5 &= x_2 \cdot x_6 + \frac{1}{St} \left(\frac{u_y}{u_\infty} - x_5 \right); \\ \dot{x}_6 &= \frac{1}{x_2} \left(-2x_2 x_6 + \frac{1}{St} \left(\frac{u_\varphi}{u_\infty} - x_2 x_6 \right) \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2.147)$$

где Fr – число Фруда, учитывающее действие сил тяжести, St – число Стокса, учитывающее действие аэродинамических сил.

Определим начальные условия для частиц материала. Начальные координаты:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 0; \\ x_2 &= \frac{d_0}{2D_1}; \\ x_3 &= 0; \end{aligned} \right\} \text{ при } \tau = \frac{t}{\tau_\infty} = \frac{t D_1}{u_0}. \quad (2.148)$$

Что касается начальной скорости частиц, то здесь могут быть варианты. Для части тонких частиц, скорость витания которых намного меньше скорости транспортирующего воздуха, начальная скорость отождествляется со скоростью воздуха при выходе из патрубка. В нашем случае:

$$\left. \begin{array}{l} v_x = u_x; \\ v_y = 0; \\ v_\varphi = u_\varphi; \end{array} \right\} \text{при } t = 0, \quad (2.149)$$

или в безразмерном виде:

$$\left. \begin{array}{l} x_4 = 1; \\ x_5 = 0; \\ x_6 = \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{2D_1}{d_0 \operatorname{tg} \gamma}; \end{array} \right\} \text{при } \tau = 0. \quad (2.150)$$

2.4. Результаты исследований пылеаэродинамики бункеров при различных способах загрузки

С использованием приведенных соотношений и уравнений в среде универсальной математической среды Maple составлены программы расчета полей скоростей воздушных потоков и траекторий частиц (см. приложения Б-Г).

Автомодельное течение в свободных струях достаточно точно описывается приведенными в п. 2.2 соотношениями для основных участков, поэтому, на достаточном удалении от патрубка, корректно сравнивать траектории при разных схемах загрузки бункеров при $x_1(0) = 0,1$ и однородных начальных составляющих скоростей частицы ($x_4(0) = x_5(0) = x_6(0) = 0$). Этим отсекаем влияние начальной скорости на координаты траектории и исключить область физически необязательных бесконечно больших скоростей воздуха в начальном участке струи (особенно в области $x_1(0) \ll 0,1$).

Полученные профили скоростей (рисунки 2.5-2.7) характеризуют динамику пылевоздушных потоков в полости бункера: значение продольной скорости характеризует пылеобразование при соударении струи падающего материала с преградой, а по поперечной скорости – об интенсивности эжекции воздуха, динамика окружной скорости используется для правильного построения траекторий движения пылевых частиц.

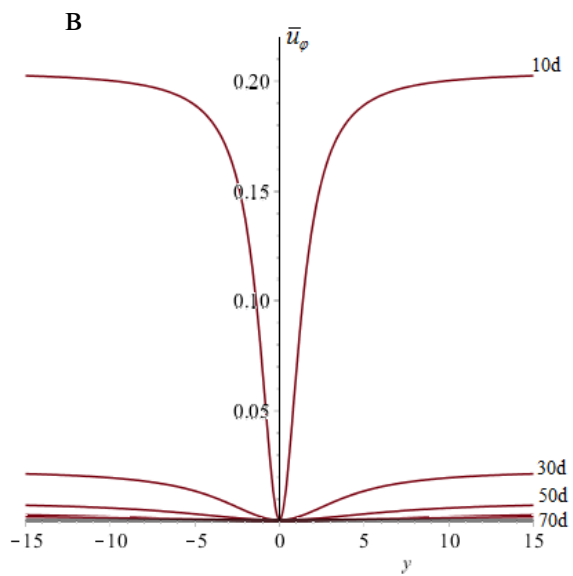
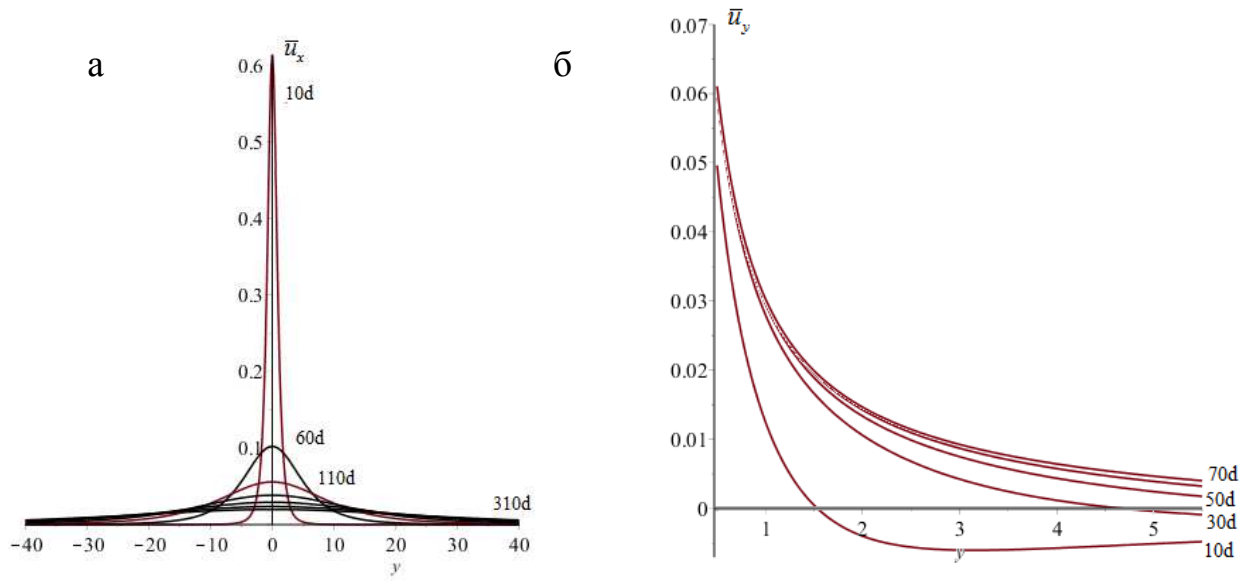


Рисунок 2.5. Поле скоростей воздушной струи при формировании осесимметричной свободной струи в узле загрузки бункера:
 а – продольная составляющая скорости;
 б – поперечная составляющая скорости;
 в – окружная составляющая скорости

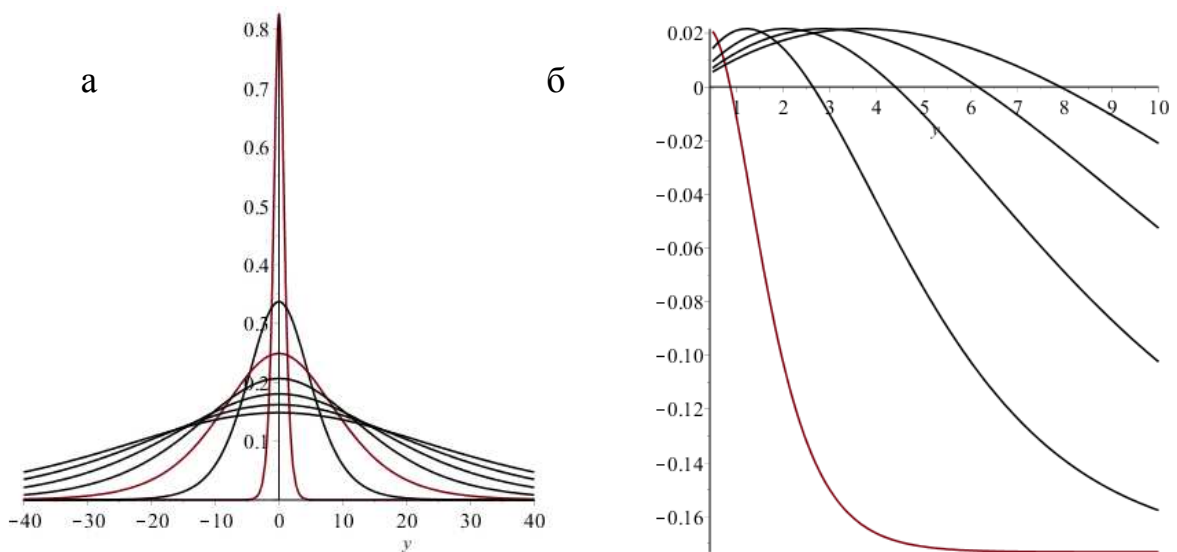


Рисунок 2.6. Поле скоростей воздушной струи при формировании плоской струи в узле загрузки бункера: а – продольная составляющая скорости; б – поперечная составляющая скорости

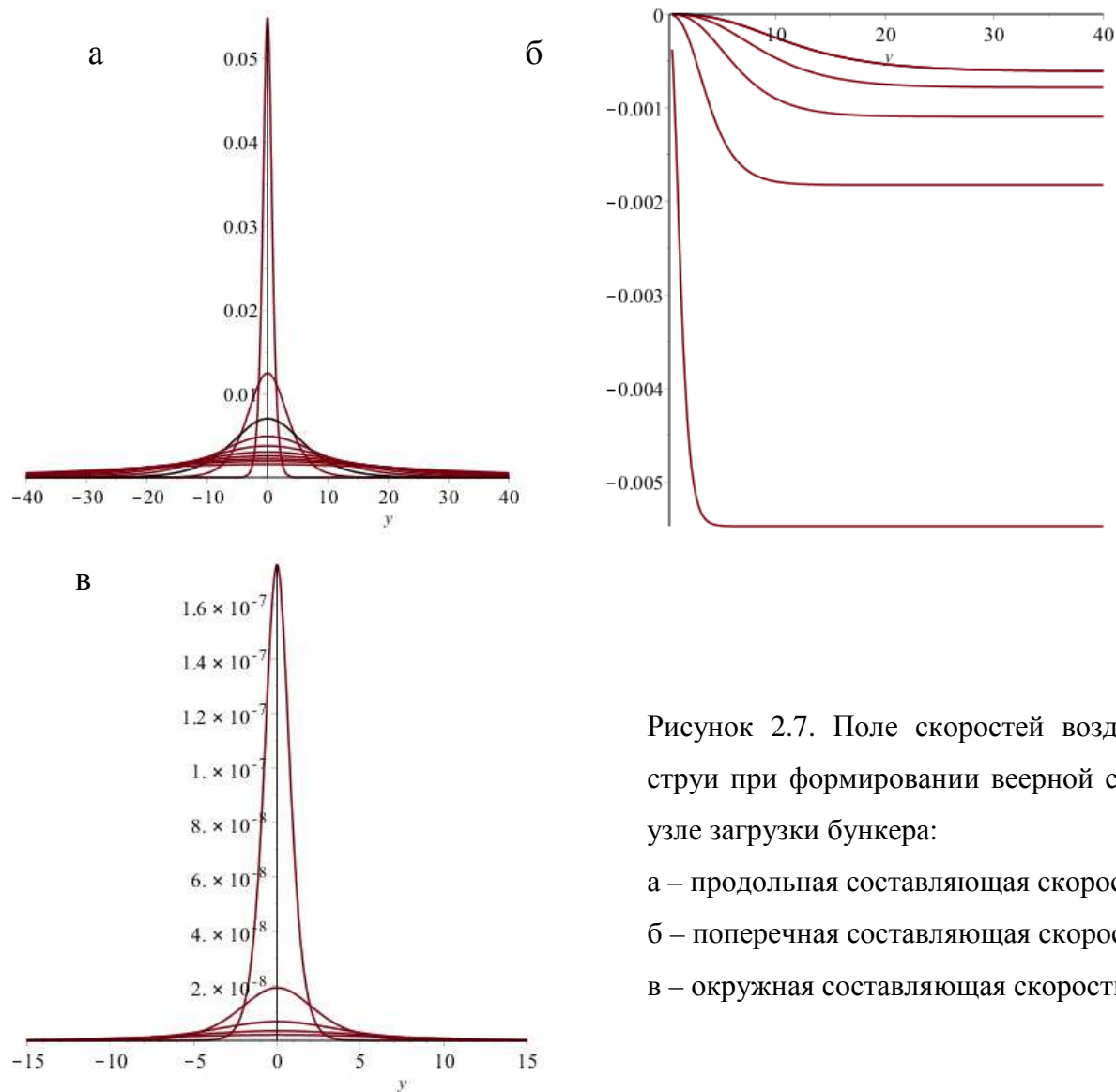


Рисунок 2.7. Поле скоростей воздушной струи при формировании веерной струи в узле загрузки бункера:

а – продольная составляющая скорости;
 б – поперечная составляющая скорости;
 в – окружная составляющая скорости

Согласно рисунку 2.6 можно сделать вывод, что пылеобразование при контакте с поверхностью материала и плоской струи будет выше, поскольку продольная скорость затухает с меньшей интенсивностью, при этом и эжектирующая способность у плоской струи выше, чем у осесимметричной.

На рисунке 2.8 приведено сравнение осевых максимальных скоростей при удалении от крышки бункера. Можно сделать вывод о том, что пылеобразующая способность веерной струи значительно ниже осесимметричной и плоской струй.

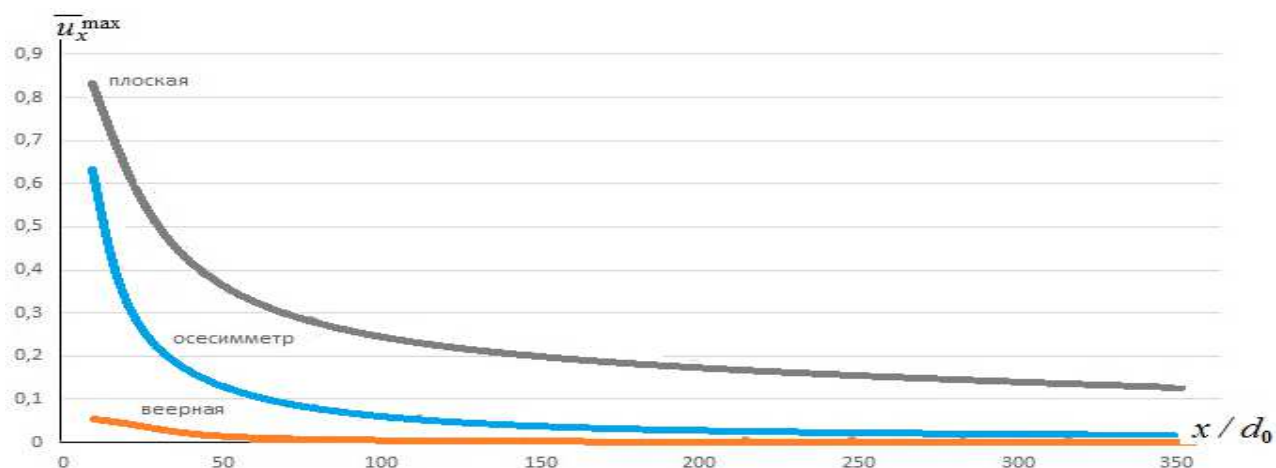


Рисунок 2.8. Изменение осевой скорости струи при удалении от крышки бункера

Что подтверждает идею работы: формирование веерной струи снижает взаимодействие с загруженным материалом, таким образом снижает пылеобразование при загрузке материала.

Однако, на конечное значение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе от бункера может повлиять унос материала непосредственно из загрузочной струи. Для анализа динамики пылевых частиц в полости бункера на основании полученных соотношений и уравнений в среде универсальной математической среды Maple составлена программа расчета траектории частиц (см. приложение Д).

Результат расчета для частиц диаметрами 5, 10 и 15 мкм при движении в условиях формирования веерной струи приведен на рисунке 2.9.

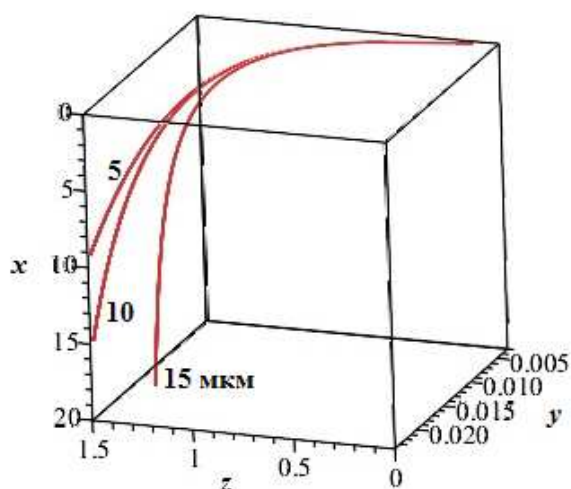


Рисунок 2.9. Траектории пылевых частиц различного диаметра при формировании веерной струи

2.5. Выводы к главе 2

1. Из дифференциальных уравнений классической теории пограничного слоя получены аналитические выражения динамики свободных струйных течений различных типов, формирующихся при загрузке бункеров: осесимметричных, плоских и веерных струй.

2. При помощи полученных аналитических выражений для расчета скорости воздушного потока построены профили продольных, поперечных и осевых скоростей осесимметричной, плоской и веерной струй.

3. Проведено сравнение взаимодействия струй различного типа с материалом, загруженным в бункер, отмечено минимальное взаимодействие веерной струи. Что подтверждает идею работы: формирование веерной струи снижает взаимодействие с загруженным материалом, что эрозию и пылеобразование.

4. При помощи численного интегрирования дифференциального уравнения динамики пылевой частицы построены траектории пылевых частиц при загрузке бункера с формированием веерной струи, характеризующие ее сепарационные особенности.

3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА

3.1. Разработка принципиальной схемы узла загрузки бункеров, обеспечивающего снижение пылеобразования

Известно устройство на основе эффекта Коанда для снижения пылеобразования при складировании сыпучих материалов [94] работающее следующим образом: сыпучий материал вместе с потоком воздуха поступает на выход щелевого сопла 1 (рисунок 3.1 а). Далее сыпучий материал 12, под действием сил инерции и сил тяжести продолжает двигаться в направлении заданным щелевым соплом 1. Давление воздуха у щелевого сопла 1 понижается и поток воздуха, истекающий из сопла 1 частично попадает через прорезь 4 разрезного цилиндра 2 внутрь его, где возникает циркуляционный вихревой поток, а основная масса воздуха 13 "прилипает" к наружной стенке цилиндра и совершает поворот на 180°, попадая в воздухозаборник б, откуда отводится с помощью устройства для отвода газа 7, например центробежного вентилятора.

Таким образом, осуществляется разделение сыпучего материала 12, который складировается в месте 11, и потока воздуха 13. Поток воздуха не контактирует с уже складированным сыпучим материалом 11, поэтому не возникает пылеобразования. Мельчайшие частички пыли увлекаются потоком воздуха 13 и попадают в воздухозаборник б, откуда поток воздуха может поступать на систему пылеочистки.

Диаметр разрезного цилиндра 2, размеры прорези 4, параметры щелевого сопла 1 и его установки относительно разрезного цилиндра 2 определяются исходя из вида сыпучего материала, расхода воздуха.

Недостатками данного устройства являются: необходимость изготовления и установки сопла с модифицированными параметрами при изменении вида сыпучего материала и расхода воздуха, а также повышенный унос материала системой пылеочистки из-за низкой степени отделения сыпучего материала от транспортирующего газа.

Известен центробежный пылеотделитель Оспанова А.М.; Балабекова О.С.;

Горбунова В.А. и др. [159] (рисунок 3.2 б) Пылеотделитель в месте соединения корпуса 1 прямоугольного сечения с бункером 5 снабжен вращающимся валком 4. Периферийная стенка 2 имеет правильную круговую форму, а противоположная стенка 3 выполнена таким образом, что в сторону движения газового потока происходит сужение поперечного сечения корпуса 1. Нижняя кромка стенки 2 расположена по линии касания к валку 4 в верхней ее точке, а стенка 3 присоединяется к верхней стенке бункера 5, расположенной в одной плоскости с точкой касания стенки 2 с вращающимся валком 4, при этом валок вращают со скоростью, равной скорости газового потока в месте их контакта.

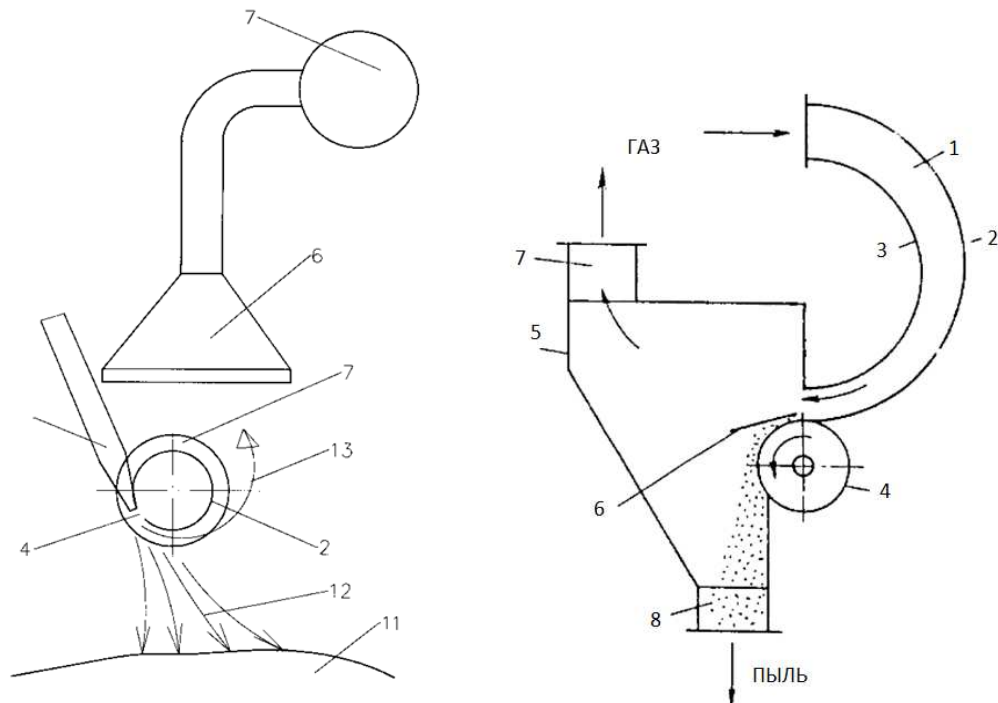


Рисунок 3.1 а – устройство снижения пылеобразования Завьялова Ю.И.;
б - центробежный пылеотделитель

Основными недостатками данного устройства являются потребность в электроэнергии для приведения в движение вала, а также сложность конструкции.

Струйно-инерционный пылеуловитель конструкции [160] (рисунок 3.2 а) работает следующим образом: «запыленный газ поступает в приемное устройство и истекает из сопла. Поток газа «прилипает» к выпуклой криволинейной поверхности (4) и распространяется по ней в окружном направлении согласно

эффекту Коанда. Под действием центробежных сил частицы пыли вылетают из струи и попадают в камеру осаждения (8). После отрыва от криволинейной поверхности поток распространяется по законам обычной затопленной струи на вертикальную стенку (14) под произвольным углом, при этом в потоке устанавливается разделительная линия тока. Очищенный газ с низкой концентрацией пыли, расположенный выше этой линии, поступает в устройство для отвода очищенного газа (7). Поток с высокой концентрацией пыли растекается вниз от разделительной линии по поверхности вертикальной стенки (14) и через щель из него удаляется часть пыли. Для создания циркуляционной зоны течения (17) и устранения прорыва этого потока в камеру осаждения на стенке установлен направляющий щиток (13), стекая с которого запыленный газ сталкивается с периферийной частью основной струи. При этом образуется вторичная низко импульсная струя (18), с которой уходит часть загрязненного потока в камеру осаждения и выносятся значительное количество пыли» [160].

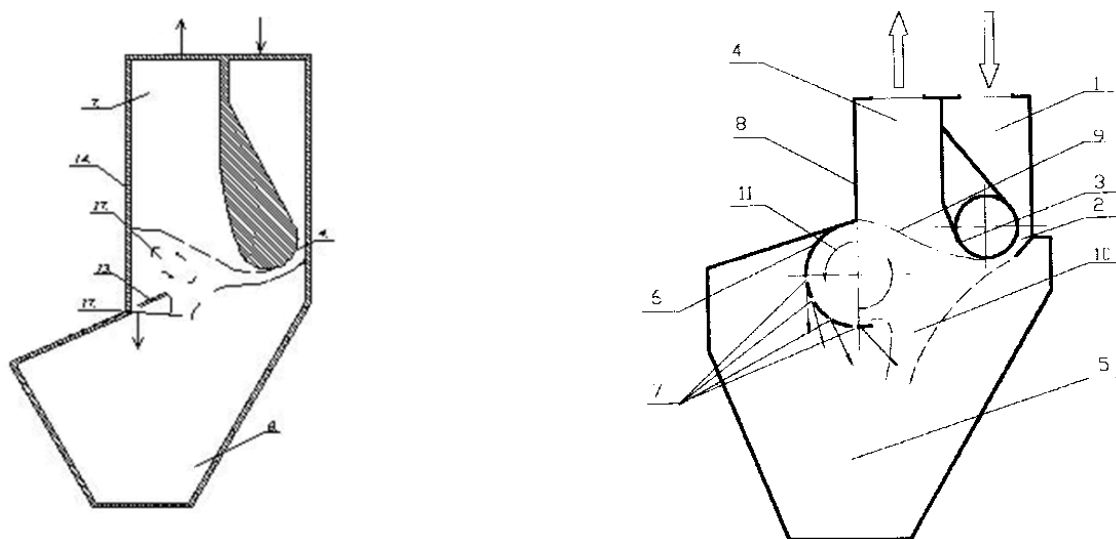


Рисунок 3.2. Струйно-инерционный пылеуловитель: а) конструкция по пат. RU 2102115
б) модернизированная конструкция

Основным недостатком данной конструкции является осаждение пыли на щитке, ее постепенное накапливание и последующее прекращение сепарации через прилегающую щель.

Струйно-инерционный пылеуловитель был в последствии доработан, как это показано на рисунке 3.2 б.

Пылеуловитель работает следующим образом: «запыленный газ попадает в устройство 1 и истекает из щелевого сопла 2. Поток газа прилипает к выпуклой криволинейной поверхности 3 и распространяется в окружном направлении согласно эффекту Коанда. Под действием сил инерции относительно крупные частицы вылетают из струи и попадают в камеру осаждения 5. После отрыва от криволинейной поверхности поток распространяется по законам обычной затопленной турбулентной струи. При натекании струи на стенки 6 и 8 в потоке устанавливается разделительная линия тока 9. Газ, расположенный выше этой линии, поступает в устройство для отвода очищенного газа 4. Поток с высокой концентрацией пыли растекается вниз от разделительной линии по полуцилиндрической стенке 6, образуя циркуляционное течение 11. Под действием центробежных сил и сил тяжести частицы сепарируются через щели 7, расположенные в нижней части стенки 6 и удаляются в камеру осаждения 5. Радиус полуцилиндрической стенки 6 подбирается таким образом, чтобы разделительная линия тока 9 попадала на границу плоской 8 и полуцилиндрической 6 стенок» [79].

В данном пылеуловителе, в отличие от прототипа, вертикальная стенка, на которую натекает струя, заменена на плоскую 8 и полуцилиндрическую 6. Одна щель, образуемая вертикальной стенкой и щитком в прототипе, заменена несколькими щелями в нижней части полуцилиндрической стенки. Щели 7 в нижней части полуцилиндрической стенки 6 не допускают пылевых отложений на ней, пыль сепарируется через щели и попадает в камеру осаждения. Нижняя часть полуцилиндрической стенки 6 играет роль щитка. Стекая с нее, запыленный поток сталкивается с периферийной частью струи, выходящей из щелевого сопла 2 и образует вторичную низко импульсную струю 10. В устройстве уменьшается аэродинамическое сопротивление: установкой полуцилиндрической стенки удается избежать лобового натекания струи на плоскую стенку 8 ниже разделительной линии тока.

Полезная модель устройства загрузки сыпучих материалов поясняется на рисунке 3.3.

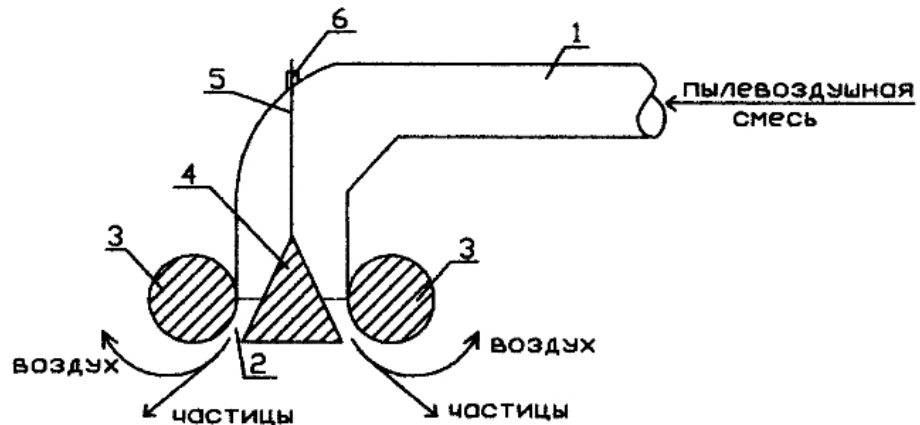


Рисунок 3.3. Устройство для снижения пылеобразования при загрузке

Устройство работает следующим образом: предварительно осуществляется настройка устройства путем вертикального перемещения стержня 5 и конуса 4: исходя из расхода воздуха, а также вида, плотности и крупности сыпучего материала выбирается рациональная величина зазора между тором 3 и конусом 4, обеспечивающая наибольший угол отклонения потока при исключении возможности забивания сыпучим материалом сопла 2. После проведения настройки положение стержня и конуса закрепляется контргайкой 6, а по трубопроводу 1 пневмотранспорта на вход сопла 2 подается смесь сыпучего материала и газа, например, цементно-воздушная смесь. При движении по соплу 2 сыпучий материал под действием сил инерции перемещается к стенке конуса 4, что обеспечивает его смещение в периферийную зону потока еще до отрыва струи от конуса 4, облегчая выход частиц из струи. Струя воздуха, вытекая из сопла с высокой скоростью, увлекает окружающий воздух, но поверхность тора препятствует свободному поступлению воздуха с одной стороны струи, способствуя понижению давления у поверхности тора и «прилипанию» к ней струи воздуха. Так как тор, при прочих равных параметрах, имеет большую площадь поверхности по сравнению с цилиндром по прототипу, то это способствует увеличению «прилипающих» и очищающихся объемов газа. Под действием инерционных сил частицы сыпучего материала вылетают из струи, продолжая двигаться в направлении, которое задается образующими конуса 4. Таким образом,

поток сыпучего материала движется в место складирования, а поток газа разворачивается согласно эффекту Коанда и отводится с помощью устройства для отвода газа, например, любой существующей системой аспирации.

3.2. План, программа и методика проведения экспериментальных исследований

3.2.1. Цели и задачи экспериментальных исследований

В результате проведенных аналитических исследований установлено, что снизить пылеобразование возможно за счет организации воздухораспределения в полости бункера, в частности изменения направления движения воздушной струи, движущейся вдоль криволинейной поверхности, т.е. создание условий для проявления аэродинамического эффекта Коанда.

Целью экспериментальных исследований является определение влияния конструктивно-технологических характеристик на условия возникновения и устойчивого развития коандовского течения при истечении воздушного потока через предлагаемое устройство.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать план проведения экспериментальных исследований;
- разработать и сконструировать экспериментальную установку;
- разработать методику измерения параметров воздушного потока;
- экспериментально установить аэродинамические характеристики потока, при различных начальных аэродинамических параметрах и геометрических характеристик загрузочного устройства.

Главная проблема при планировании эксперимента заключается в выборе значений факторов при проведении эксперимента, в последовательности их чередования при переходе от одного опыта к другому. Данная проблема имеет принципиальное значение, так как от способа варьирования значений факторов зависит точность оценки степени влияния отдельных факторов в многофакторном эксперименте на параметр щели, а также время проведения эксперимента. Поэтому для снижения трудоемкости и времени проведения эксперимента необходимо

придерживаться определенного алгоритма действий (см. рисунок 3.4).



Рисунок 3.4. Схема проведения многофакторного эксперимента

3.2.2. Планирование эксперимента

Согласно результатам аналитических исследований, выполненных в главе 1, в качестве основных факторов, влияющих на налипание струи (реализацию эффекта Коанда) при работе устройства для снижения пылеобразования, показанного на рисунке 3.3, выделим следующие геометрические характеристики (рисунок 3.5): диаметр (или радиус) тора, ширина щели между конусом и тором, и положение данной щели:

$$v_i = f(d_{\text{кон}}; d_{\text{т.кон}}; d_{\text{тор}}; d_{\text{вх}}; H_{\text{к}}; h_{\text{кон}}; v_{\text{вх}}). \quad (3.1)$$

Согласно существующим рекомендациям к планированию эксперимента (1) такое количество факторов может привести к повышению количества натуральных экспериментов и неоправданным затратам времени и других ресурсов. Так как

проведение даже численного эксперимента с данным количеством факторов неоправданно, нами были выделены факторы, которые позволили учесть максимальное количество геометрических размеров предлагаемого устройство и при этом обеспечить вписывание конуса в тор:

геометрические характеристики обтекателя потока (тора):

$$R_1 = R_2 \cdot \sin \alpha; \quad (3.2)$$

геометрические характеристики разделителя потока (конуса):

$$(3.3)$$

$$\beta = 180 - \alpha - \gamma; \quad (3.4)$$

геометрические характеристики взаимного расположения разделителя и обтекателя потока:

$$\sin \gamma = \frac{H}{R_2}; \quad H = R_2 \cdot \sin \gamma; \quad (3.5)$$

$$\gamma = 180 - \alpha - \beta; \quad (3.6)$$

$$\sin \alpha = \frac{R_1}{R_2}. \quad (3.7)$$

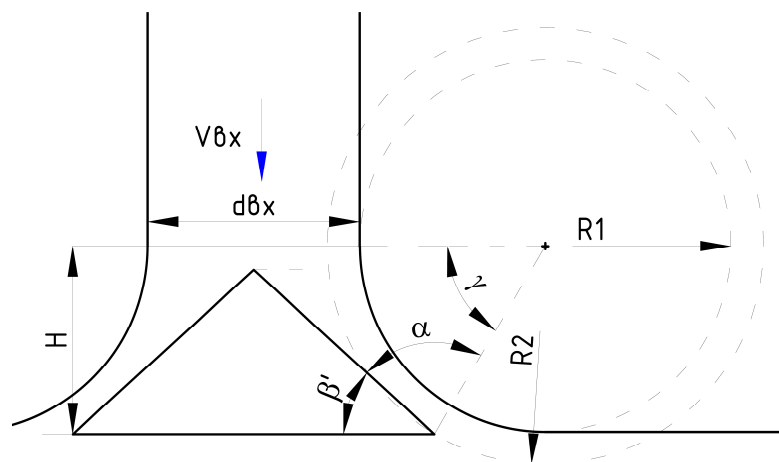


Рисунок 3.5. Основные геометрические характеристики устройства

В качестве отклика принята максимальная V_{\max} и средняя V_{med} составляющая проекции скорости на ось X. Для снижения количества факторов эксперимента группируем их, тогда зависимость (3.1), примет вид:

$$v_i = f\left(\frac{R_1}{R_2}; \frac{\beta'}{\beta}; \gamma\right). \quad (3.8)$$

В качестве плана эксперимента принят ЦКОП (центральный композиционный ортогональный план). В таблице 3.1. приведена область факторного пространства выбранного плана эксперимента. Для учета условий работы устройства при различных эксплуатационных характеристиках системы пневмотранспорта замеры повторялись при различных начальных скоростях потока: 5, 15, 25 м/с.

Таблица 3.1

Область факторного пространства ЦКОП

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

3.2.3. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рисунок 3.6) для определения условий реализации эффекта Коанда на разрабатываемом устройстве представляет собой воздухораспределитель, состоящий из патрубка с тороидальной поверхностью и конусного разделителя потока, подключенного к вентиляционной сети (рисунок 3.7) гибким (гофрированным) воздуховодом.

В качестве побудителя принят вентилятор ВР-80-75-3,15. Регулировка расхода воздуха производилась регулирующими клапанами.


Для измерения скорости приточного воздуха в точках измерения использовался термоанемометр Testo 425. Измерения производились с помощью зонда с обогреваемой струной, характеристики которого представлены в таблице 3.2.

Все вышеперечисленные приборы внесены в Государственный Реестр средств измерений РФ.



Рисунок 3.6. Экспериментальная установка: а) общий вид экспериментальной установки; б) измерительный прибор; в) элементы устройства снижения пылеобразования: 1 – подающий патрубок с тороидальной поверхностью; 2 – конусный разделитель потока: а – с высотой 60 мм, б – с высотой 40 мм; 3 – воздуховод вентиляционной сети; 4 – воздушный регулирующий клапан; 5 – измерительный зонд; 6 – термоанемометр; 7 – штатив; 8 – координатная сетка (миллиметровка);

Таблица 3.2
Характеристики термоанемометра Testo 425
с зондом с обогреваемой струной

	Параметр	Значение
	Диаметр наконечника	7,5 мм
	Длина трубки зонда	820 мм
	Диапазон измерений	0...20 м/с
	Погрешность	$\pm(0,03 \text{ м/с} + 5\% \text{ от изм. знач.})$
	Рабочая температура	0...70 °С

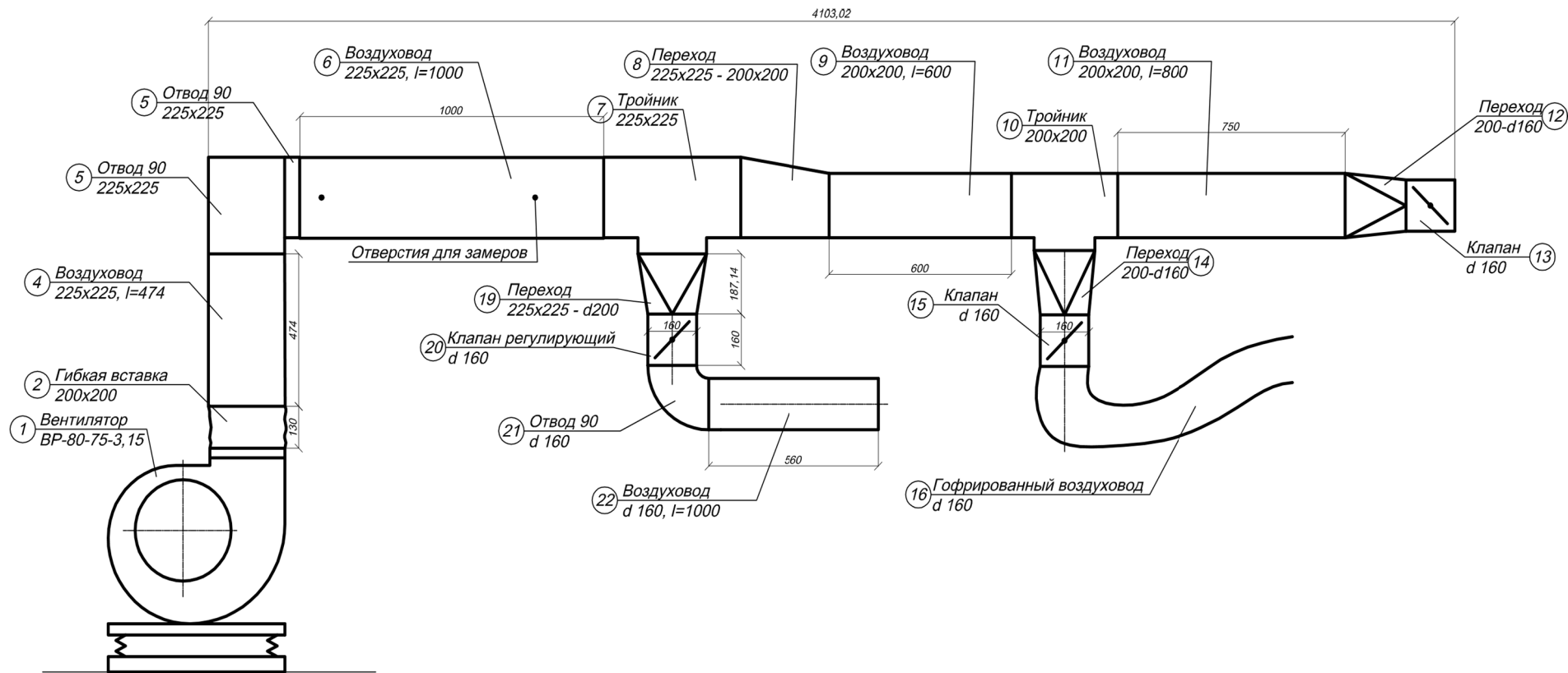


Рисунок 3.7. Нагнетательная ветвь лабораторной вентиляционной сети:

1 – вентилятор ВР-80-75-3,15; 2 – гибкая вставка; 3, 6, 9, 11, 22 – воздуховод; 4, 5, 21 – отвод; 7, 10 – тройник; 8, 12, 14, 19 – переход; 13, 15, 20 – клапан регулирующий; 16 – гофрированный воздуховод

Геометрические характеристики патрубка и характеристики побудителя тяги соответствуют реальным условиям загрузки цементных силосов ЗАО «Белгородский цемент».

Подключение экспериментальной установки к действующей лабораторной вентиляционной сети позволяет количественно регулировать воздушный поток, что обеспечит возможность выполнения замеров при различных эксплуатационных характеристиках.

3.2.4. Методика проведения экспериментальных исследований

Проведение экспериментальных исследований выполняется в соответствии с принятым центральным композиционным ортогональным планом эксперимента, в следующей последовательности.

1. Выбрать необходимый разделитель потока (конус).
2. Установить его относительно обтекателя (тора) путем вертикального перемещения и фиксации на определенном уровне.
3. Включить вентилятор в сеть.
4. Обеспечить необходимую скорость в устье исследуемого устройства путем ограничения расхода воздуха регулирующими клапанами 13, 15, 20, поступающего в воздуховод 16 (рисунок 3.12).
5. Установить зонд термоанемометра в определенную точку на линии измерения, находящейся на расстоянии $2d$ от оси тора (или $3,5d$ от центра патрубка), где d – диаметр подающего патрубка).
6. Произвести замеры температуры, скоростей (максимальной и усредненной по времени) потока.
7. Замеры производить в 5 точках линии измерения скорости, перпендикулярной координатной сетке, расположенной на расстоянии $3,5d$ от центра патрубка, где d – диаметр подающего патрубка, высота линии измерения скорости соответствует диаметру подающего патрубка d .

Высота линии измерения скорости равна 0,12 м. Точки замера соответствуют точкам замера на высотах: 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1.

При проведении замеров также необходимо фиксировать температуру внутреннего воздуха в помещении.

3.3. Результаты экспериментальных исследований условий реализации эффекта Коанда на разрабатываемом устройстве

Измерения проводились при значении температуры воздуха $t=21,3^{\circ}\text{C}$.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 3.3 при начальной скорости потока 5 м/с. Для снижения трудоемкости и материалоемкости при изготовлении элементов экспериментальной установки, в частности разделителя потока (конуса), проведем сравнение с результатами вычислительного эксперимента, выполненного с помощью программного комплекса SolidWorks.

Таблица 3.3
Результаты натурных экспериментальных исследований

№ эксперимента	Скорость, м/с						результаты численного эксперимента	
	натурные замеры в точках линии измерения скорости					среднее значение по линии измерения скорости	SolidWorks	ур-я регрессии
	т.1	т.2	т.3	т.4	т.5			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4,63	4,54	4,52	3,97	3,27	4,186	4,76	4,205
2	2,53	1,42	1,21	1,04	0,56	1,352	1,2	1,299
3	0,91	0,69	0,53	0,51	0,42	0,612	0,64	0,478
4	0,09	0,23	0,61	1,1	0,73	0,552	0,23	-0,266

Сравнение средних значений скорости с расчетами (таблица 3.3) показывает высокую степень их связи. Коэффициент корреляции Пирсона равен $0,998 \pm 0,0029$. Достоверность расчетов подтверждаются критерием Стьюдента равным 0,024, адекватность расчетов подтверждается критерием Фишера равным 1,47.

Таким образом, хорошая сходимость результатов, проведенных вычислительных и лабораторных экспериментов, позволяет использовать для дальнейших экспериментальных исследований программный комплекс SolidWorks, в соответствии с разработанным планом. На рисунке 3.8 приведены граничные условия проведения вычислительного эксперимента.

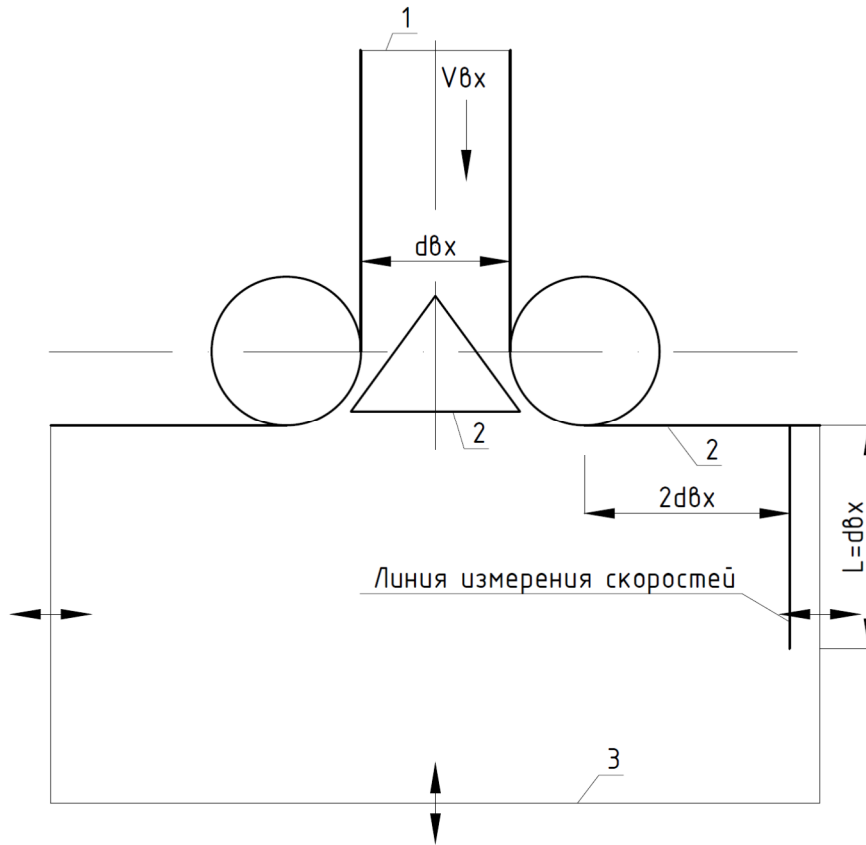


Рисунок 3.8 Граничные условия вычислительного эксперимента: 1 – плоскость входа воздуха;
2 – непроницаемые стенки; 3 – плоскость свободного давления

В таблице 3.4 приведены основные результаты вычислительного эксперимента при различных начальных скоростях потока. Жирным шрифтом выделены результаты экспериментов, в которых произошло налипание струи, что характеризует изменение направления движения струи, согласно эффекту Коанда.

Таблица 3.4
Факторы и результаты вычислительного эксперимента

№ эксперимента	R_1/R_2	β'/β	γ	при $V_{вх}=5$ м/с		при $V_{вх}=15$ м/с		при $V_{вх}=25$ м/с	
				V_{med}	V_{max}	V_{med}	V_{max}	V_{med}	V_{max}
1	0,65	0,15	79	0,3	0,62	0,77	1,89	1,73	3,6
2	0,65	0,15	11	-0,03	0	-0,08	0	-0,17	0
3	0,65	0,85	11	-0,026	0	-0,067	0	-0,12	0
4	0,95	0,85	79	1,54	4,76	4,24	14,51	7,37	26,6
5	0,8	0,5	88,76	0,26	0,7	0,61	1,81	1,12	3,25
6	0,95	0,85	11	0	0,03	0,04	0,17	0,01	0,11
7	0,8	0,5	45	0,13	0,36	0,37	1,04	0,66	1,66

Продолжение таблицы 3.4.

8	0,99	0,5	45	0,63	1,2	1,93	3,61	2,6	5,24
9	0,8	0,95	45	0,07	0,09	0,32	0,74	0,37	0,54
10	0,95	0,15	79	0,31	0,64	0,96	2,05	1,55	3,45
11	0,65	0,85	79	0,08	0,23	0,4	1,23	0,1	0,91
12	0,95	0,15	11	0	0,03	-0,11	-0,01	-0,04	0,11
13	0,8	0,049	45	0,35	0,62	1,07	1,89	2,05	3,14
14	0,61	0,5	45	-0,04	-0,001	-0,12	-0,02	-0,19	-0,02
15	0,8	0,5	45	0,2	0,43	0,56	1,3	0,83	2,17
16	0,8	0,5	1,24	-0,02	0	-0,08	0	-0,11	0

Примечание: V_{\max} – максимальная скорость V_x в плоскости измерения; V_{med} – средняя скорость V_x в плоскости измерения.

Анализ результатов экспериментальных исследований, представленных в таблице 3.4 и рисунке 3.9 показал, что максимальное значение составляющей скорости на ось X достигается в эксперименте №4. Кроме того эффект налипания воздушной струи происходит в экспериментах №1, 4, 5, 7, 8, 10 и 13.

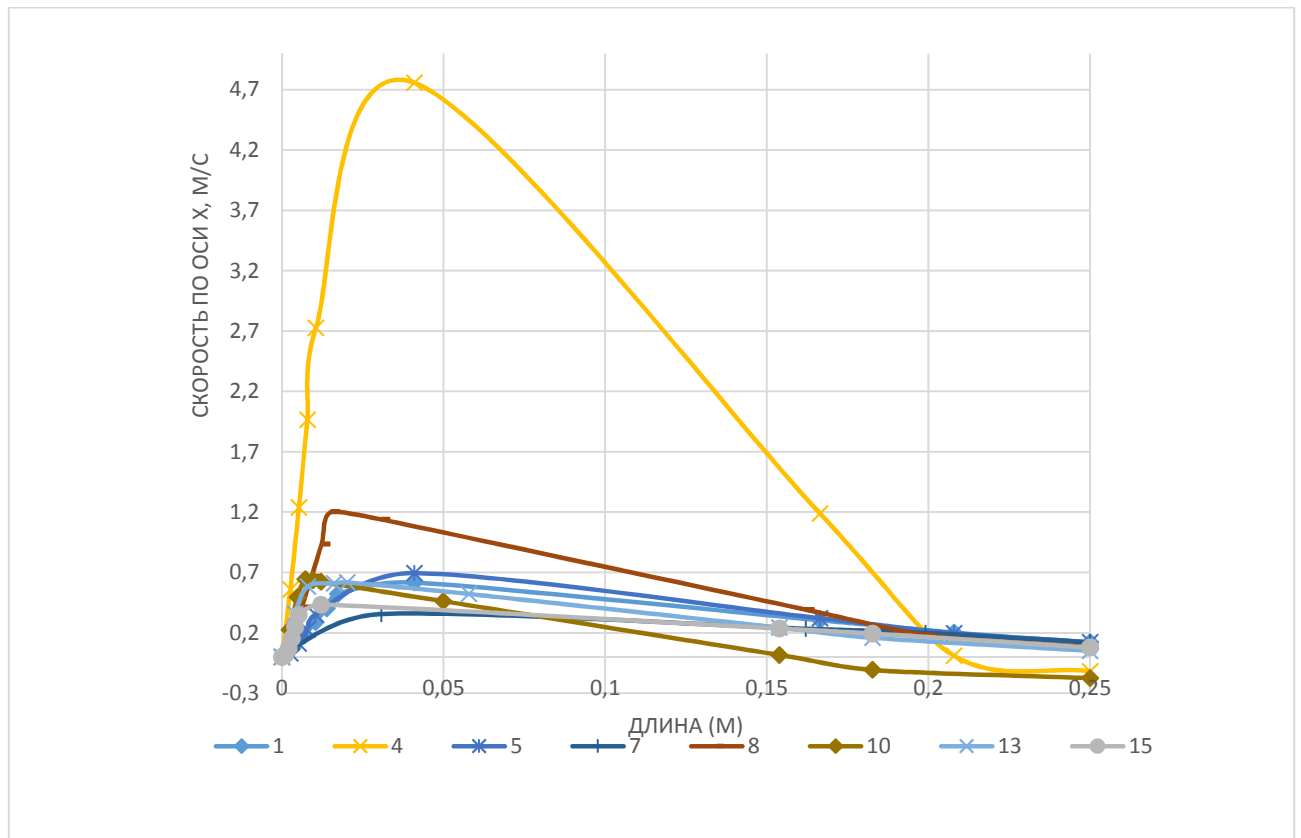


Рисунок 3.9. Профили скоростей на измеряемой линии при $V_{\text{вх}}=5$ м/с, построенные по результатам экспериментов, где произошло налипание струи

При этом устойчивое проявление эффекта Коанда в серии экспериментов при скорости $V_{вх}=5$ м/с проявляется при $V_{med}>0,13$ м/с и $V_{max}>0,36$ м/с.

На рисунке 3.10 приведены результаты экспериментов, в которых коандовское течение не было сформировано, а соответственно геометрические характеристики, соответствующие экспериментам 2, 3, 6, 9, 11, 12, 14, 16 не желательны при работе исследуемого устройства.

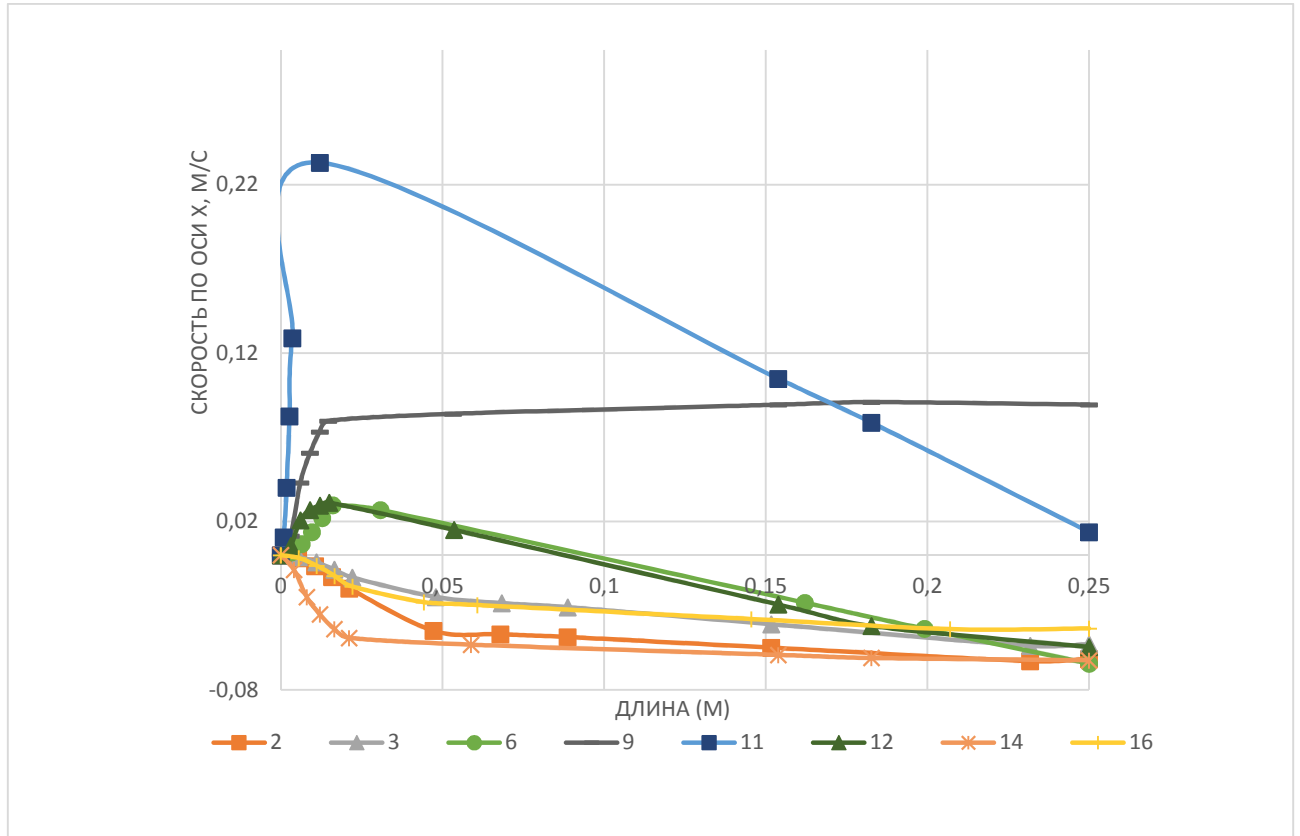


Рисунок 3.10. Профили скоростей на измеряемой линии при $V_{вх}=5$ м/с, построенные по результатам экспериментов, где не произошло налипание струи

В экспериментах 9 и 11 основной поток воздуха устремляется вниз, несмотря на то, что в некоторых направлениях от оси входа воздуха и происходит налипание, но оно является неустойчивым и хаотичным.

На рисунках 3.11 – 3.13 приведены линии тока и вектора движения воздуха, полученные при моделировании работы исследуемого устройства при различных комбинациях факторов эксперимента. Что подтверждает существующую теорию коандовских течений, представленную в п. 1.3 данной работы: сцепление движущегося потока обеспечивает вовлечение в поток окружающей среды.

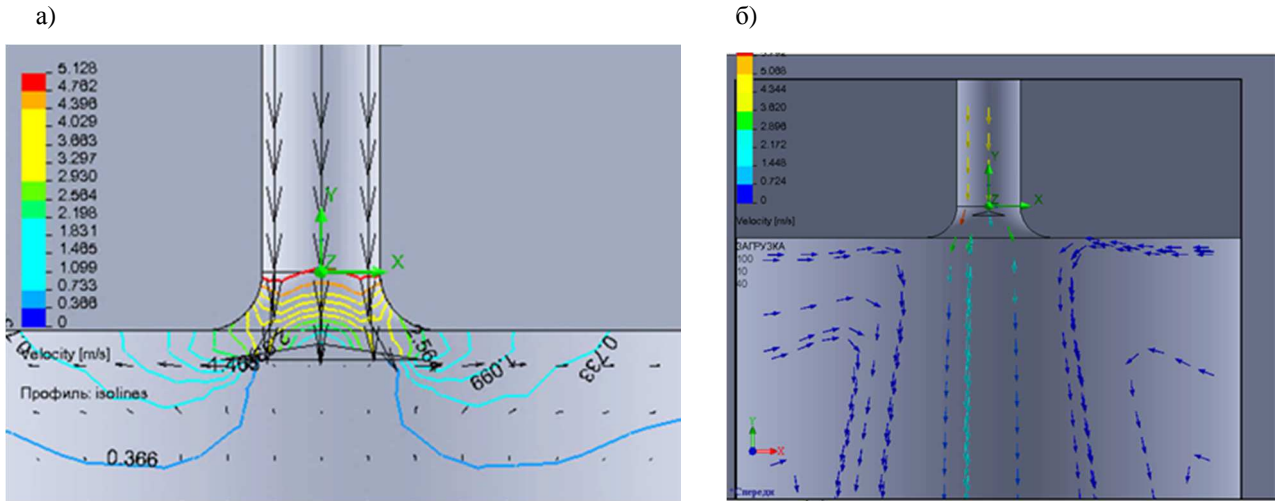


Рисунок 3.11. Линии тока и векторное поле скоростей воздуха, полученные при $V_{вх}=5$ м/с: а) в эксперименте №1; б) в эксперименте №2.

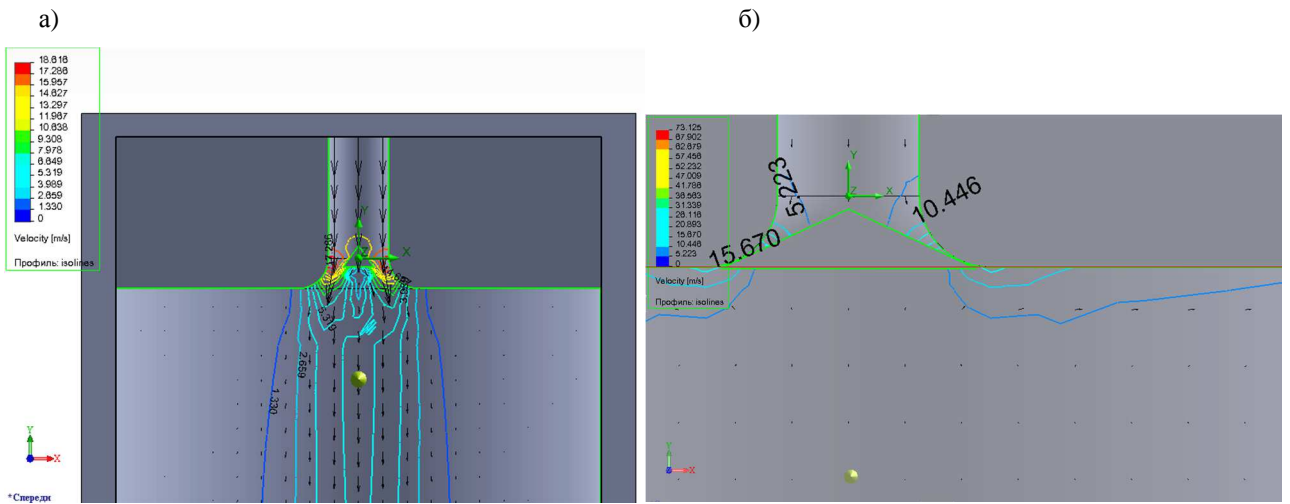


Рисунок 3.12. Линии тока и векторное поле скоростей воздуха, полученные при $V_{вх}=5$ м/с: а) в эксперименте №3; б) в эксперименте №4.

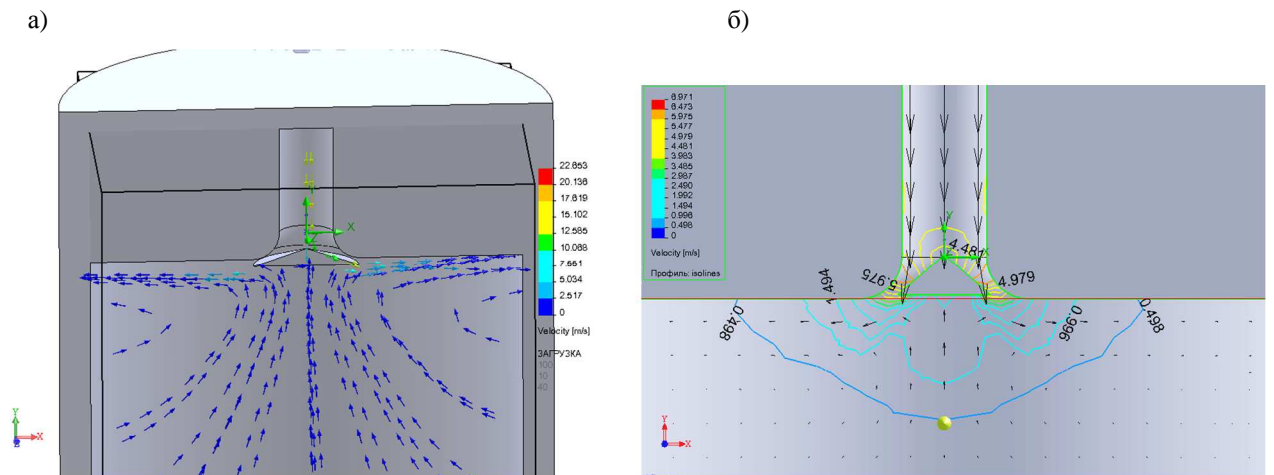


Рисунок 3.13. Линии тока и векторное поле скоростей воздуха, полученные при $V_{вх}=5$ м/с: а) в эксперименте №5; б) в эксперименте №7.

Соответственно, чем выше составляющая скорости на ось X, тем устойчивее налипание струи. В тоже время, увеличение скорости воздуха во входном патрубке до 15 м/с и выше, приводит к увеличению проекции скорости V_{med} и V_{max} на ось X, налипание струи в экспериментах 9 и 11, не происходит, имеющееся соотношение конструктивных параметров не обеспечивает формирование условий для проявления эффекта Коанда. В экспериментах 1,4, 5, 7, 10, 13, данный эффект сохранил свое проявление при скорости во входном патрубке 15 м/с и 25 м/с (рисунок 3.14).

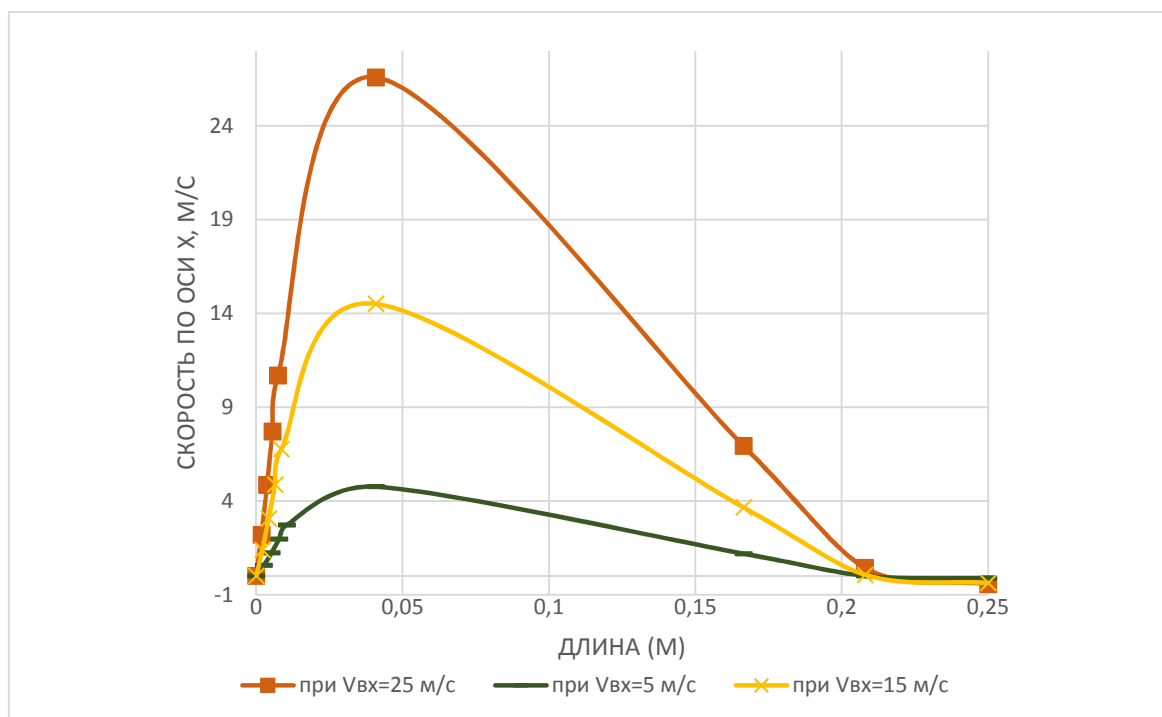


Рисунок 3.14. Профили скоростей в измеряемой линии в эксперименте №4 при различных $V_{вх}$

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

3.4. Рациональные конструктивно-режимные параметры устройства

Для выявления рационального соотношения конструктивно-режимных параметров обеспечивающего создание эффекта Коанда, получены уравнения регрессии (3.9) – (3.14).

При скорости $V_{вх}=5$ м/с

Предсказ. уравнение для V_{med} :

$$V_{med} = -0,2576 + 0,42235 \cdot (R_1/R_2) + 0,60082 \cdot (\beta'/\beta) + 0,01460 \cdot \gamma - 1,139 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,0163 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,0709 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 0,10182 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \quad (3.9)$$

Предсказ. уравнение для V_{max} :

$$V_{max} = -0,0713 + 0,43151 \cdot (R_1/R_2) + 1,7860 \cdot (\beta'/\beta) + 0,03714 \cdot \gamma - 3,474 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,0479 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,2135 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 3,1583 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \quad (3.10)$$

При скорости $V_{вх} = 15$ м/с

Предсказ. уравнение для V_{med} :

$$V_{med} = -0,3388 + 0,65404 \cdot (R_1/R_2) + 0,87675 \cdot (\beta'/\beta) + 0,02590 \cdot \gamma - 2,054 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,0261 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,1680 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 0,24601 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \quad (3.11)$$

Предсказ. уравнение для V_{max} :

$$V_{max} = 0,16692 + 0,73182 \cdot (R_1/R_2) + 4,4479 \cdot (\beta'/\beta) + 0,09785 \cdot \gamma - 9,111 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,1276 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,6029 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 0,90616 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \quad (3.12)$$

При скорости $V_{вх} = 25$ м/с

Предсказ. уравнение для V_{med} :

$$V_{max} = 0,16692 + 0,73182 \cdot (R_1/R_2) + 4,4479 \cdot (\beta'/\beta) + 0,09785 \cdot \gamma - 9,111 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,1276 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,6029 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 0,90616 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \quad (3.13)$$

Предсказ. уравнение для V_{max} :

$$"V_{max}" = 0,29225 + 1,3098 \cdot (R_1/R_2) + 10,575 \cdot (\beta'/\beta) + 0,22003 \cdot \gamma - 19,90 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,2842 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 1,233 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 1,8095 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \quad (3.14)$$

Полученные регрессионные уравнения имеют приемлемый уровень значимости, коэффициент детерминации составляет 0,78 (см. таблицу 3.5). На рисунке 3.15 представлен график наблюдаемых и предсказанных значений.

Таблица 3.5

Ведомость расчета коэффициента детерминации

	V_{med}	V_{max}		V_{med}	V_{max}
Множест. - R	0,94	0,94	MS - Модель	0,29	2,57
Множест. - R2	0,88	0,89	SS - Остаток	0,27	2,29
Скоррект - R2	0,78	0,79	сс - Остаток	8	8
SS - Модель	2,06	17,96	MS - Остаток	0,034	0,286
сс - Модель	7	7	F	8,61	8,97
			p	0,003	0,003

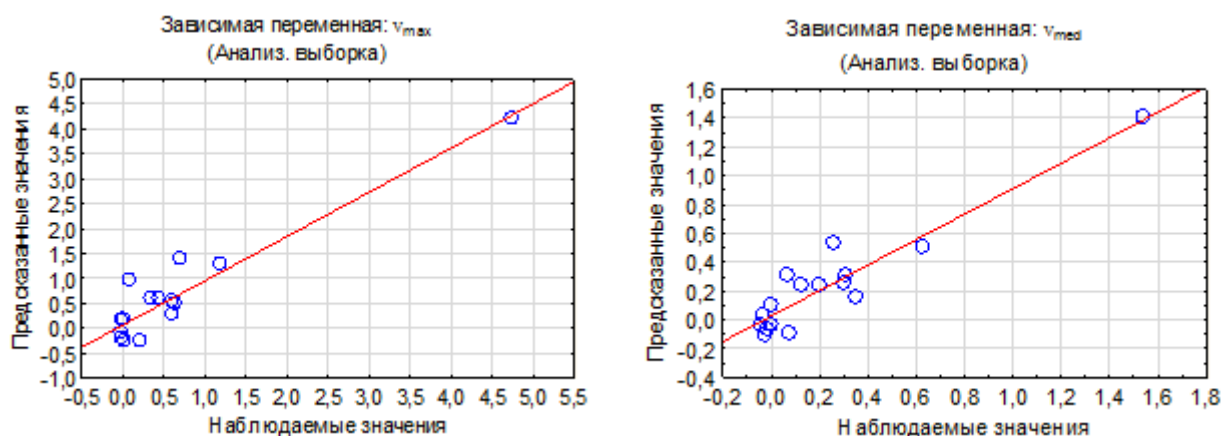


Рисунок 3.15. Графики наблюдаемых и предсказанных значений
проекции скоростей V_{max} и V_{med} на ось X

На основании полученных регрессионных уравнений были построены графики функции желательности (рисунок 3.15), соответствующие предсказанным значениям каждой зависимой переменной. На графике функции желательности отображена желательность отклика (V_{max} или V_{med}), лежащая в интервале от 0 до 1 вместе с наблюдаемыми диапазонами для каждой зависимой переменной. Данный график построен для общей желательности на каждом уровне каждого фактора (R_1/R_2 , β'/β , γ), при этом другие факторы зафиксированы в текущих уровнях. Проанализировав профили (рисунок 3.16), совместно с контурами желательности (рисунок 3.17) можно определить рациональное соотношение конструктивных параметров, для получения желаемого значения отклика.

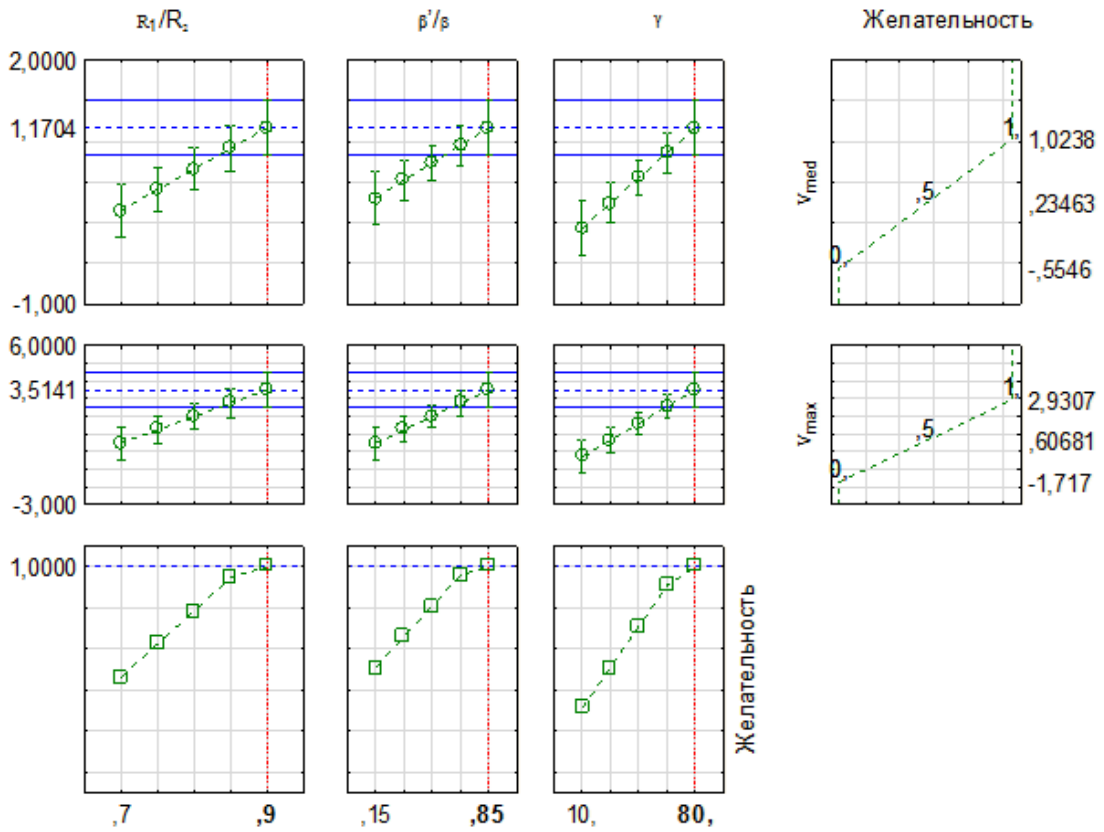


Рисунок 3.16. Профиль для предсказанных значений и желательности проекции скоростей V_{max} и V_{med} на ось X (при $V_{вх} = 5$ м/с)

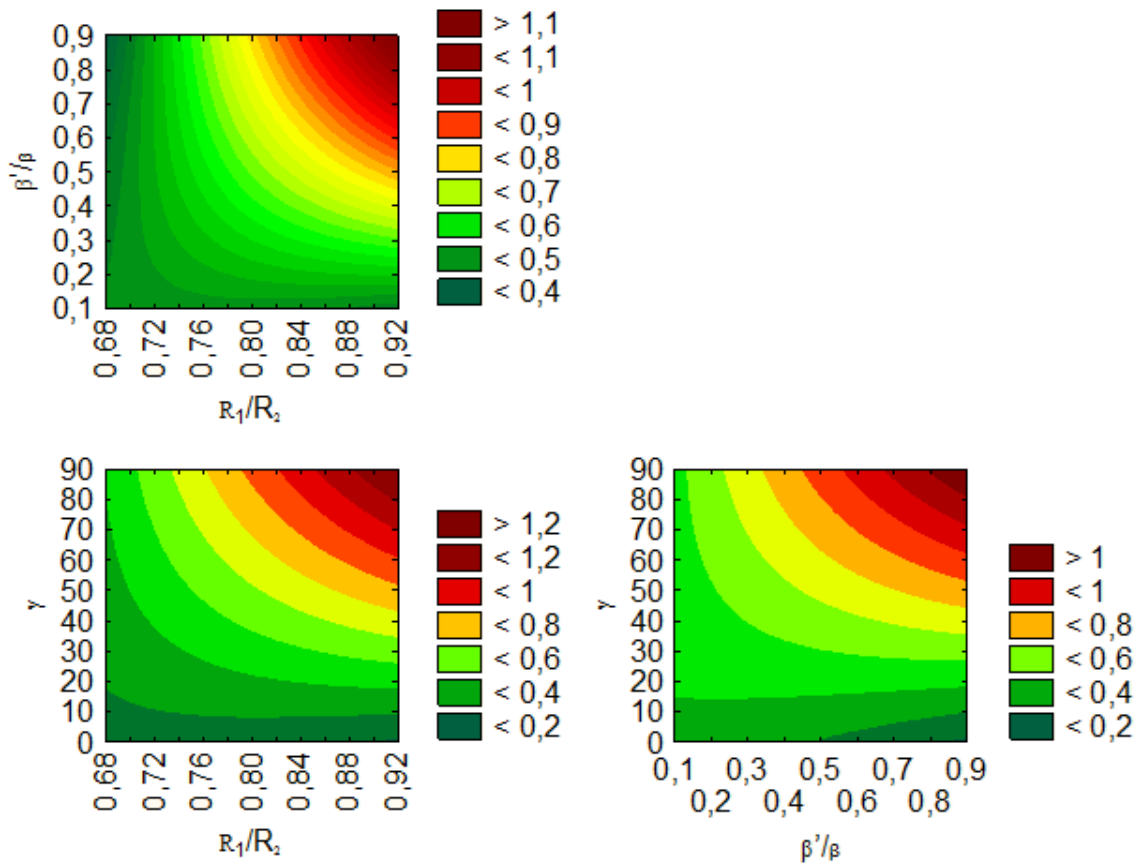


Рисунок 3.17. Контуры желательности, полученные методом квадратичной подгонки

В нашем случае желаемым значением отклика является максимальное значение V_{\max} и V_{med} , так как именно в этом случае налипание струи проявляется наиболее характерно. При этом функция желательности определялась при следующих диапазонах исследуемых факторов: $R_1/R_2=0,7\dots0,9$; $\beta'/\beta=0,15\dots0,85$; $\gamma=10\dots80$. Данные диапазоны выбраны исходя из технологических соображений.

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

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

Полученные уравнения могут использоваться в дальнейшем для оптимизации работы предлагаемого загрузочного устройства в условиях производства.

3.5. Выводы к главе 3

1. На уровне полезной модели разработана и запатентована оригинальная конструкция загрузочного узла бункера, в аэродинамическую схему которого заложено формирование коандовских течений, что обеспечивает исключение взметывания складированного материала.

2. Определены цели и задачи экспериментальных исследований условий реализации эффекта Коанда на разрабатываемом устройстве. В качестве плана принят ЦКОП трехфакторного эксперимента.

3. Разработана и изготовлена лабораторная установка, подобрана методика проведения эксперимента.

4. Установлена хорошая сходимость результатов вычислительных и лабораторных экспериментов: сравнение средних значений скорости с расчетами показывает высокую степень их связи. Коэффициент корреляции Пирсона равен

$0,998 \pm 0,0029$. Достоверность расчетов подтверждаются критерием Стьюдента равным $0,024$, адекватность расчетов подтверждается критерием Фишера равным $1,47$.

5. Согласно результатам эксперимента исходя от геометрических характеристик устройства, выделены три типа поведения воздушной струи: налипающая на верхнюю стенку, наклонная и направленная вертикально вниз.

6. На налипание струи (возникновение эффекта Коанда) особое влияние оказывает малый размер щели между разделителем (конусом) и обтекателем (тором) потока, положение конуса, обеспечивающее наилучшее подтекание воздуха к конусу снизу.

7. В качестве рациональных конструктивных параметров, для проявления эффекта Коанда приняты следующие значения: $R_1/R_2=0,9$; $\beta'/\beta=0,85$; $\gamma=80^\circ$, при этом данный эффект сохранил свое проявление при скоростях во входном патрубке в $5, 15$ и 25 м/с.

8. Для выявления рационального соотношения конструктивно-режимных параметров обеспечивающего создание эффекта Коанда, получены уравнения регрессии, позволяющие определять скорости воздушного потока на некотором расстоянии от загрузочного патрубка, исходя из выбранных геометрических характеристик. Полученные регрессионные уравнения имеют приемлемый уровень значимости, коэффициент детерминации составляет $0,78$.

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Рекомендуемые схемы систем вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов

4.1.1. Техническое описание предлагаемых систем вентиляции

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования являются основой для предлагаемого способа аспирации бункеров при их пневмотранспортной загрузке.

В результате аналитического обзора исследований условий пылеобразования, технических решений и методик расчета систем обеспыливающей вентиляции бункеров определены недостатки существующих способов аспирации. Предложен способ повышения эффективности систем вентиляции, обеспечивающий снижение концентрации пылевых частиц в вентиляционных выбросах от бункеров, загружаемых порошкообразными материалами. Это достигается за счет совершенствования конструкции узла пневмотранспортной загрузки бункеров порошкообразными материалами.

Включение в аэродинамическую схему загрузочного узла бункера эффекта Коанда, заключающегося в изменении направления воздушных струй, движущихся вдоль криволинейной поверхности, обеспечивает снижение действия одного из главных факторов пылеобразования: контакт пневмотранспортной струи с поверхностью хранящегося в бункере материала.

Указанное повышение эффективности систем вентиляции достигается тем, что в способе аспирации загружаемого пневмотранспортом склада сыпучих материалов, заключающемся в том, что запыленный воздух, образующийся при перегрузке сыпучего материала, направляется в полости соседних бункеров к месту отвода, транспортируется к обеспыливающей установке, подвергается инерционному сепарированию по эффекту Коанда, в результате чего твердая фаза оседает в полости бункера, а очищенная газовая фаза продолжает движение не соприкасаясь с материалом, хранящимся в бункере, не взметывая его.

На рисунке 4.1 показан склад готовой продукции цементного завода при

линейной компоновке бункеров. Бункера оснащены системами пневмотранспорта для загрузки и выгрузки материала, а также системами аэрации и вентиляции.

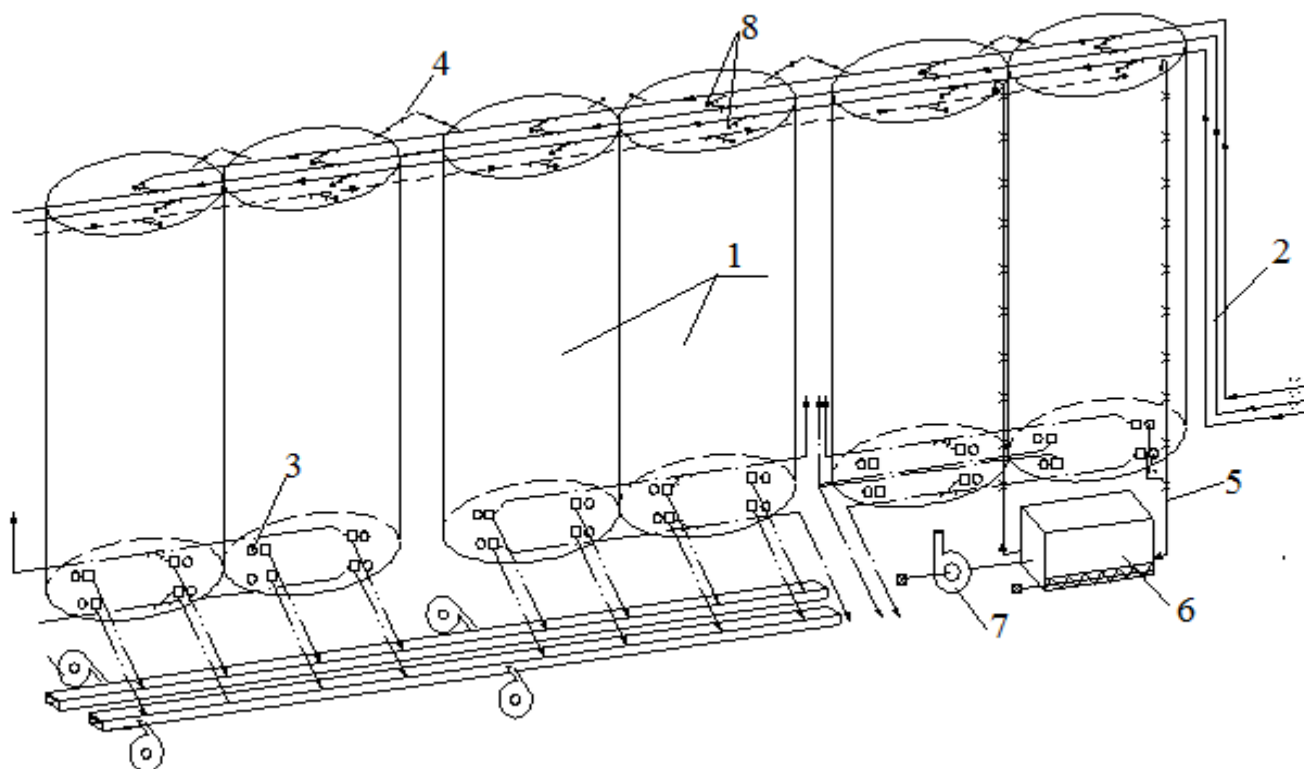


Рисунок 4.1. Склад сыпучих материалов, при линейной компоновке бункеров: 1 – бункер, 2 – трубопроводы системы пневмотранспорта, 3 – элементы системы аэрации, 4 – переточные каналы, 5 – аспирационный воздуховод, 6 – рукавный фильтр, 7 – вентилятор, 8 – загрузочное отверстие

Данный склад сыпучих материалов (рисунок 4.1) включает несколько бункеров. Важным элементом системы вентиляции являются Л-образные переточные каналы, которые прикреплены фланцевым соединением к бункерам, что позволяет объединять полости соседствующих бункеров. Воздухозаборный трубопровод входным патрубком неподвижно закреплен на крышке бункера, а выходным патрубком – с входным патрубком вытяжного вентилятора, выходной патрубком которого сообщен с обеспыливающей установкой. Предлагаемое устройство для снижения пылеобразования устанавливается в загрузочное отверстие бункера.

Система аспирации загружаемого пневмотранспортом склада сыпучих материалов работает следующим образом.

При загрузке одного из бункеров пылевоздушная смесь поступает в его полость через загрузочный патрубок, соединенный с трубопроводом

пневмотранспорта. При выходе трубопровода системы пневмотранспорта поток натекает на обтекатель Коанда в результате чего происходит инерционное сепарирование: согласно эффекту Коанда газовая составляющая «налипает» на поверхность обтекателя Коанда, а пылевые частицы по инерции осаждаются в полости бункера. Затем запыленный воздух направляется к воздухозаборному трубопроводу, при этом возможны перетоки через Л-образные переточные каналы, до бункера, из которого производится удаление запыленного воздуха воздухозаборным трубопроводом. В следствии работы вытяжного вентилятора запыленный воздух транспортируется от воздухозаборного трубопровода к обеспыливающей установке.

Конструкция сопла, ограниченного тором и конусом обеспечивает не только снижение уноса частиц системой пылеочистки, но и уменьшение «раздувания» и пылеобразования загруженного материала. Однако при промышленной апробации были обнаружены некоторые недостатки, связанные с монтажом и эксплуатацией устройства. Поэтому дальнейшая разработка устройства направлена на упрощение монтажа и сервисного обслуживания устройства.

Указанный результат достигается тем, что устройство, содержащее обтекатель и разделитель потока, согласно предлагаемому решению дополнительно содержит короб. В предлагаемом решении короб состоит из верхней и нижней части, соединенных с возможностью перемещения и фиксации в промежуточных положениях и крышки с патрубком для подачи пылегазовой смеси.

Благодаря тому, что устройство содержит короб, состоящий из телескопически соединенных частей упрощается монтаж и сервисное обслуживание.

Устройство (рисунок 4.2) состоит из короба, образованного верхней 1 и нижней 2 частью, например, трубами различного диаметра, соединенными между собой подвижным соединением для обеспечения возможности перемещения верхней части и фиксации в промежуточных положениях, например, телескопическим и крышки 3, которая неподвижно прикреплена к верхней части короба. К крышке, прикреплен патрубок 4 для подачи пылевоздушной смеси, а также прикреплен стержень 5, ко второму концу которого прикреплен разделитель потока 6. К

нижней кромке нижней 2 части короба прикреплен обтекатель 7, выполненный в виде тела вращения.

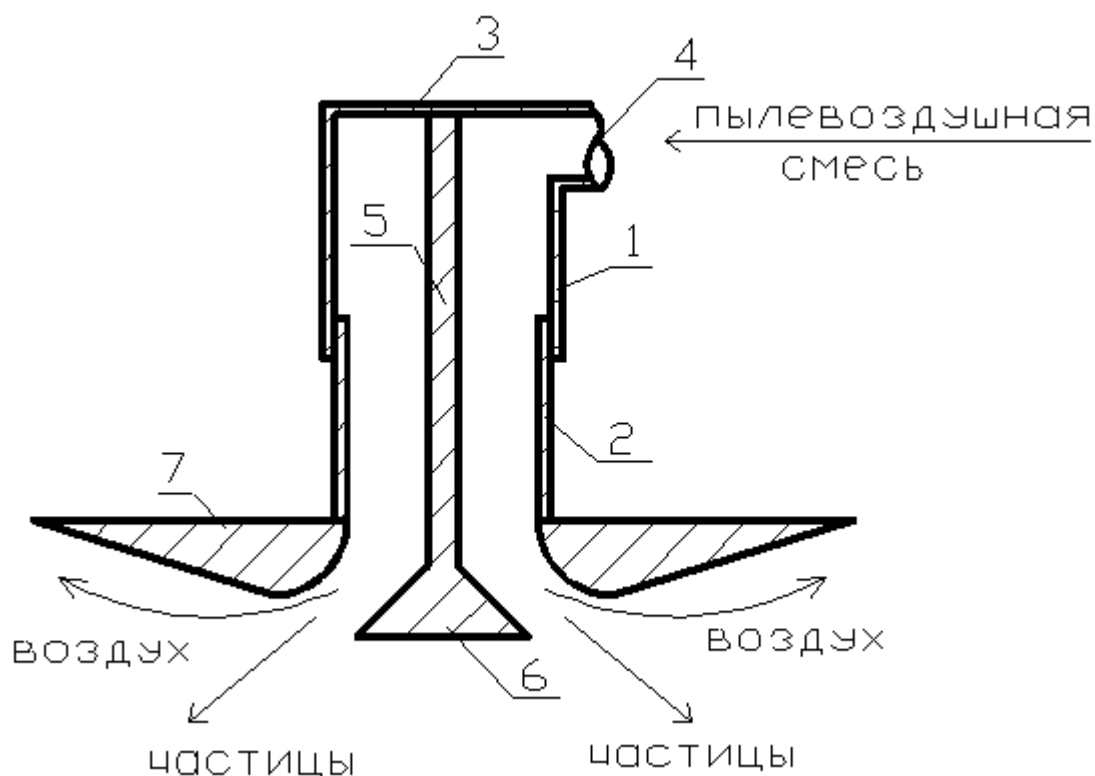


Рисунок 4.2. Модернизированное устройство для снижения пылеобразования при загрузке порошкообразных материалов

Устройство работает следующим образом.

Предварительно устройство монтируется в загрузочный проем бункера. При этом крышка посредством патрубка для подачи пылевоздушной смеси соединяется с трубопроводом системы пневмотранспорта. Затем осуществляется настройка устройства: путем вертикального перемещения нижней части короба, вместе с закрепленным на ней обтекателем относительно неподвижных крышки, верхней части, стержня и разделителя потока. Исходя из расхода воздуха, а также вида, плотности и крупности сыпучего материала выбирается оптимальная величина зазора между обтекателем и разделителем потока, обеспечивающая наибольший угол отклонения потока при исключении возможности забивания сыпучим материалом данного зазора. При движении в полости короба пылегазовая смесь попадает в зазор между обтекателем и разделителем потока. Сыпучий материал под действием сил инерции перемещается к разделителю потока, что обеспечивает его

смещение в периферийную зону потока, облегчая выход частиц из струи. Струя воздуха, вытекая из зазора между обтекателем и разделителем потока с высокой скоростью, увлекает окружающий воздух, но поверхность обтекателя препятствует свободному поступлению воздуха с одной стороны струи, способствуя понижению давления у поверхности обтекателя и «прилипанию» к ней струи воздуха. Таким образом, поток сыпучего материала движется в место складирования, а поток газа разворачивается согласно эффекту Коанда и отводится с помощью устройства для отвода газа.

Однако, при выходе воздушного потока из переточного канала возможно вторичное взметывание материала, находящегося в бункере. Для снижения запыленности аспирационного воздуха необходимо устранить возможность возникновения данного явления. Поставленная цель достигается также тем, что в системе аспирации загружаемого пневмотранспортом склада сыпучих материалов содержащая Л-образные переточные каналы, попарно соединяющие полости рядом стоящих бункеров, воздухозаборный трубопровод, входной патрубок которого соединен с одним из бункеров, а выходной - с входным патрубком вытяжного вентилятора, выходной патрубок которого сообщен с обеспыливающей установкой дополнительно содержит обтекатель Коанда, устанавливаемый на выходе из переточного канала.

Оснащение воздухозаборными трубопроводами двух бункеров и дополнение системы аспирации элементом переключения обеспечит исключение снижения эффективности работы системы при загрузке бункера, из которого осуществляется удаление воздуха воздухозаборными трубопроводами.

При групповом размещении бункеров (рисунок 4.3), оснащенных воздухозаборными трубопроводами двух бункеров каждый из них входным патрубком закрепляют на крышке бункера, а выходным патрубком – с элементом переключения, в качестве которого может быть применен двухходовой переключатель с дистанционным управлением, третий патрубок которого соединяют с входным патрубком вытяжного вентилятора.

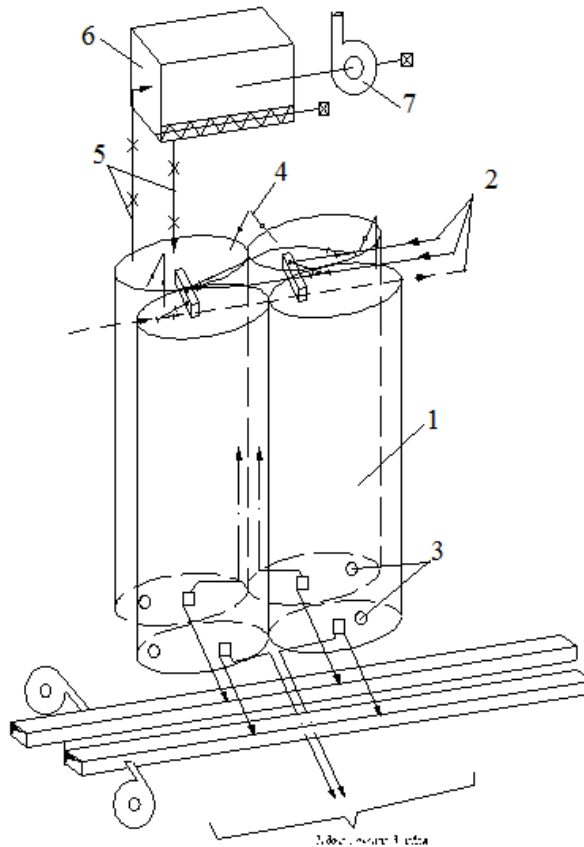


Рисунок 4.3. Склад сыпучих материалов, при групповой компоновке бункеров: 1 – бункер, 2 – трубопроводы системы пневмотранспорта, 3 – элементы системы аэрации, 4 – переточные каналы, 5 – аспирационный воздуховод, 6 – рукавный фильтр, 7 – вентилятор

При оснащении воздухозаборными трубопроводами двух бункеров с помощью элемента переключения к месту отвода, при перетоке в полость следующего бункера запыленный воздух подвергается инерционному сепарированию по эффекту Коанда, в результате чего твердая фаза оседает в полости бункера, а очищенная газовая фаза продолжает движение не соприкасаясь с материалом, хранящимся в бункере, таким образом, не взметывая его, транспортируется к обеспыливающей установке, очищается.

4.1.2. Методика расчета предлагаемых систем вентиляции

С учетом предложенных конструктивных особенностей необходимо уточнить методику расчета аспирационной сети, заключающаяся в следующих последовательных стадиях расчета: определение массовой концентрации перемещаемой смеси; определение диаметров воздуховодов в ответвлениях и

уточнение скоростей движения воздуха; определение потерь давления на участках и их увязка; уточнение массовой концентрации смеси и определение потерь давления в сети; определение потерь давления в коллекторе и в узле; расчет пылеулавливающего аппарата; подбор вентилятора и электродвигателя к нему; уточнение потерь давления в сети с учетом вентилятора; расчет материального баланса процесса пылеулавливания.

Таким образом, с учетом включения устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов в конструкцию узла пневмотранспортной загрузки бункера необходимы уточнения при определении массовой концентрации перемещаемой смеси. Для этого определяются составляющие скорости воздушного потока по формулам (2.68), (2.72), (2.77), (2.91), (2.135) в зависимости от типа воздушной струи, формируемой в загрузочном узле. Определение концентрации и дисперсного состава взмываемой пыли необходимо установить по известным зависимостям [28, 30, 33, 37] условий взаимодействия потока загружаемого материала с преградой.

В зависимости от геометрических характеристик бункера, расхода загружаемого материала и предварительных значений концентрации и дисперсного состава взмываемой пыли определяются рациональные конструктивно-эксплуатационные параметры устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов. Рекомендуется выбирать характеристики, обеспечивающие прилипание воздушной струи к крышке бункера согласно эффекту Коанда в соответствии с результатами экспериментальных исследований, представленных в таблице 3.4 и рисунке 3.9.

Для окончательного расчета концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе необходимо оценить осаждение материала при движении его в полости бункеров. При значительных размерах бункеров и сообщении их переточными каналами рекомендуется учитывать силы инерционного пылеосаждения. По формуле, предложенной Падва В. Ю. [96], определяется значение парциальных степеней очистки для выходного сечения из группы бункеров (в данном случае работающих, как пылеосадительная камера):

$$\eta_n = 100 \left[1 - \frac{1}{i} \sum_o^i n \right], \quad (4.1)$$

где i – число точек расчета концентрации частиц; n – отношение концентраций частиц определенного диаметра в расчетной точке на выходе к их концентрации во входном сечении.

Величина n определяется из уравнения

$$n = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1, \quad (4.2)$$

где $\Phi(x)$ – интеграл вероятности.

Значения x_1 и x_2 определяются по формулам:

$$x_1 = \frac{1 + \frac{h}{H} - \frac{L}{H} (w_u/w_z)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}; \quad (4.3)$$

$$x_2 = \frac{1 - \frac{h}{H} + \frac{L}{H} (w_u/w_z)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}, \quad (4.4)$$

где h – расстояние от крышки бункера до поверхности складированного материала, w_u – скорость витания частиц того размера, для которого определяется значение η_n .

Для расчета скорости осаждения частиц пыли определяется вязкость среды $\mu_{см}$, Па·с. Вязкость компонентов, входящих в состав аспирационного воздуха, при рабочих условиях:

$$\mu_i = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}, \quad (4.5)$$

где μ_0 – вязкость газа при 0 °С, C – постоянная Сезерленда.

Определяется скорость осаждения (седиментации) частиц пыли крупнее заданного размера под действием силы тяжести, м/с:

$$\omega_s = \frac{d_u^2 \rho_u g}{18 \mu_{см}}. \quad (4.6)$$

Поскольку геометрические характеристики бункера известны, то

рассчитываются фракционная и общая степени очистки. Для чего уточняется скорость газового потока в сечении камеры, м/с:

$$\omega_z = \frac{Q}{H \cdot B}. \quad (4.7)$$

Для более полного осаждения пыли скорость движения газа в них должна быть небольшой (не более 3 м/с), для эффективного осаждения пылевых частиц также подбираются геометрические характеристики устройства для снижения пылеобразования уравнениям регрессии (3.9) – (3.14).

Находится относительная скорость частиц, осаждаемых в бункере с эффективностью 50 %:

$$\left(\frac{\omega_{\text{ч}}}{\omega_z} \right) \cong 1,5 \frac{H}{L}; \quad (4.8)$$

$$(\omega_{\text{ч}})_{50} = 1,5 \frac{H}{L} \omega_z. \quad (4.9)$$

По номограмме для определения скорости витания частиц находится при данной плотности частиц диаметр частиц, улавливаемых с эффективностью 50 % – d_{50} .

Для определения зависимости $\eta_n = f(d_{\text{ч}})$ выбираются дополнительные значения $\omega_{\text{ч}}'$ и $\omega_{\text{ч}}''$ из соотношения

$$\frac{\omega_{\text{ч}}'}{\omega_z} < \frac{\omega_{\text{ч}}}{\omega_z} < \frac{\omega_{\text{ч}}''}{\omega_z}. \quad (4.10)$$

Этим значениям относительных скоростей витания $\omega_{\text{ч}}'$ и $\omega_{\text{ч}}''$ соответствуют диаметры частиц $d_{\text{ч}}'$ и $d_{\text{ч}}''$.

Среднее количество пылевых частиц в выходном сечении можно определить, как среднюю из концентраций в характерных точках. Для значений h/H : 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1 и рассчитываются значения x_1 , x_2 , $\Phi(x_1)$, $\Phi(x_2)$, и для двух величин относительных скоростей частиц $\omega_{\text{ч}}'/\omega_z$ и $\omega_{\text{ч}}''/\omega_z$. По полученным величинам n определяются их средние значения $n_{\text{ср}}'$ и $n_{\text{ср}}''$ и величины:

$$\eta_n' = 100(1 - \eta_{\text{ср}}') \text{ для } d_{\text{ч}}' \quad (4.11)$$

$$\eta_n'' = 100(1 - \eta_{cp}'') \text{ для } d_{ч}'' \text{.} \quad (4.12)$$

В результате расчета получены три значения парциальных степеней очистки газа: $\eta_{ч}'$, η_{50} , $\eta_{ч}''$.

Общая степень очистки:

$$\eta = \sum \eta_n \frac{N_{ex}}{100} \Delta d_{ч} \text{.} \quad (4.13)$$

Или

$$\eta = \sum \eta_{\phi} \frac{\Phi_{ex}}{100} \text{.} \quad (4.14)$$

Данный расчет рекомендуется в качестве инженерного, более точные методы расчета, рассмотрены в [69, 161], показывают, что даже при оптимальных условиях степень осаждения частиц размером менее 30 мкм не превышает 50%, и обычно их используют в качестве предварительной ступени очистки. Однако, синергетический эффект применения аэродинамического эффекта Коанда в узле загрузки и организации воздухораспределения для создания условий инерционного осаждения в полости бункеров позволяет обеспечить снижение концентрации пылевых частиц перед обеспыливающим аппаратом, а также снижение запыленности на рабочих местах в цехах и окружающей среде.

4.2. Обеспыливание цементных силосов ЗАО «Белгородский цемент»

4.2.1. Характеристика условий производства

Выходящий из мельницы цемент, по аэрожелобам подается в приемный бункер пневматического насоса. Цемент в виде аэросмеси транспортируется насосом по цементопроводу со скоростью 15-30 м/с, достаточной для того, чтобы цементные зерна удерживались в воздушном потоке. Чтобы переключать подачу цемента в ответвляющийся цементопровод, устанавливается двухходовой переключатель с пневматическим дистанционным управлением. На верху силоса находится распределительный цементопровод, соединенный с питательным цементопроводом. Из него цементная аэросмесь через двухходовые переключатели поступает в патрубки, а затем в силос.

При вылеживании в силосе цемент охлаждается и в нем продолжается процесс гашения свободной извести, если она не полностью погасилась во время нахождения клинкера в клинкерном складе.

При хранении в больших емкостях цемент, особенно если он содержит даже небольшое количество влаги, слеживается и ссыпаясь при разгрузке, часто образует своды. Эти своды затрудняют очистку емкостей и, кроме того, при обрушении могут вызвать аварию.

Поэтому цемент при разгрузке подвергают аэрации, то есть вводят в него воздух. Это полностью исключает возможность образования сводов. Воздух, медленно протекая между зернами цемента придает ему большую подвижность, и аэрированный цемент приобретает текучесть. Помимо гарантии от образования сводов, аэрирование позволяет полностью разгружать силос.

Согласно схеме, принятой на предприятии, один рукавный фильтр обслуживает блок силосов. Характеристика склада хранения цемента приведена в таблице 4.1. Таким образом, на верхней отметке каждого блока железобетонных силосов старого цементного склада установлены рукавные фильтры ФРКН-180 с вентиляторами ВДН-9у. Суммарная производительность двух аспирационных установок составляет $Q=24000$ м³/час, что обеспечивает работу фильтров с удельной газовой нагрузкой 1.0 м³/(м²*мин) (допустимая нагрузка составляет 1.7 м³/(м²*мин)), при загрузке силосов от трех цементных мельниц и одновременной выгрузке из всех восьми силосов. Сброс уловленной пыли осуществляется непосредственно в силос.

На крыше блока новых силосов диаметром 6 м установлен фильтр Е-48 с электроподогревом, производительностью $Q=13500$ м³/час с центробежным вентилятором Pol KNL 520/145к, изготовленные в Германии на заводе «Zementlagenbau Dessau» в 1959 году.

В связи с невозможностью размещения аспирационных установок на верхних отметках металлических силосов старого склада и силосах диаметром 15 м нового, предусмотрены специальные помещения для рукавных фильтров рядом с силосами над железнодорожными вагонами.

Характеристика склада хранения цемента

№ силоса	кол-во часов работы в год	хар-ка источника выброса			хар-ка выбросов			хар-ка установки обеспыл.				выбросы				
		источник выброса	высота источника	диаметр	скорость	объем	температура	тип газоочист. установок	коэф. обесп. газоочист., %	средняя степень очистки	максимал. степень очистки	загрязняющ. в-во	г/с	мг/м ³	т/год	валовый выброс по источнику, т/год
1-6	8300	труба	21	0,5	9,48	1,86	30	ФРКИ-180	100	98,8	99,5	пыль неорганическая 70-20% SiO ₂ (пыль цемента)	0,41	220,43	11,414	11,414
7-10	200		21	0,5	14,43	2,831	19	ФРКИ-180	100	95,7	99,5		1,83	646,4	1,3176	
	300		21	0,5	14,43	2,831	19	ФРКИ-180	100	95,7	99,5		1,021	360,65	1,1026	
11-14	6920	труба	21	0,5	13,94	2,736	40	ФРКИ-180	100	98,6	99,5		0,33	120,6	6,265	6,265
													0,505	269,6	3,334	3,334
16	3460	труба	20	1	2,41	1,88	28	6 ЦН-15 ФРКИ-180	100	99	99,8		0,598	203,4	5,737	
17	3360	труба	20	1	3,71	2,94	38	6 ЦН-15 ФРКИ-180	100	99	99,8		0,58	197,3	0,1656	
	100												0,598	203,4		

Здесь установлен рукавный фильтр типа ФРКН-360 с вентилятором ВДН-11у1. Производительность такой установки составляет 24000 м³/час, что также обеспечивает работу фильтра с удельной газовой нагрузкой 0.95 м³/(м²*мин) при работе трех мельниц и одновременной выгрузке из шести силосов.

Сбор уловленного цемента осуществляется винтовым конвейером диаметром 320 мм в бункер пневмокамерного насоса ГА-23Б. Транспорт пыли осуществляется по трубопроводу диаметром 150 мм в один из двух цементных силосов блока.

Расчет аспирационных установок и подбор оборудования выполнен с учетом возможности подключения к ним аспирации загрузки железнодорожных вагонов.

4.2.2. Описание предлагаемого решения и результата

Конструкция загрузочного узла модернизирована в соответствии с

разработанным и запатентованным (приложение Е, Ж) устройством для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов. Техническое решение для бункера, входящего в состав одного из четырех силосов приведено на рисунке

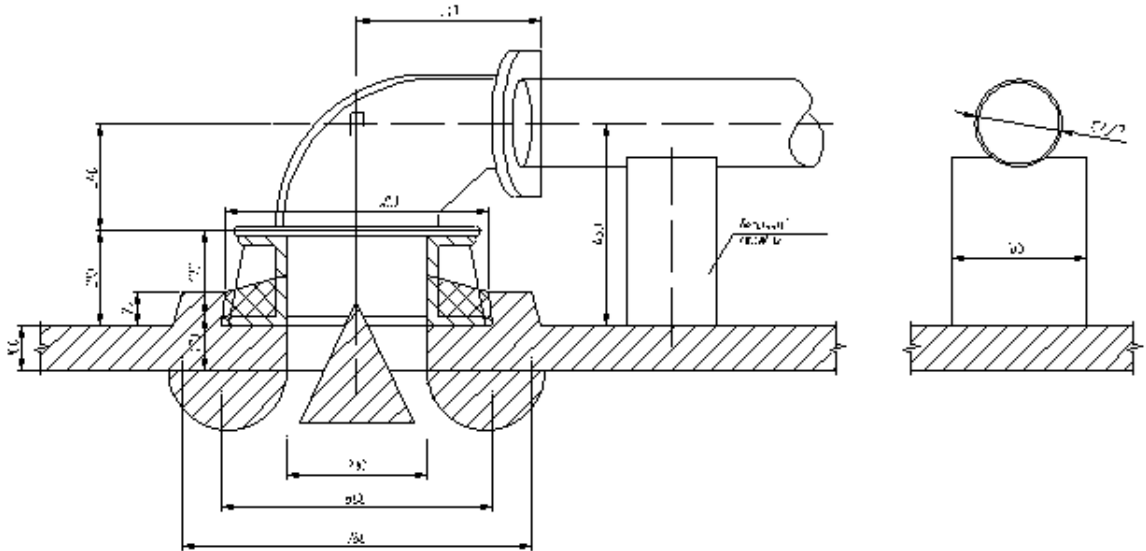


Рисунок 4.4. Конструкция загрузочного узла цементного бункера

Устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих веществ прошло промышленные испытания в условиях загрузки силосного склада цементного завода ЗАО «Белгородский цемент»: акт промышленных испытаний приведен в приложении К, результаты - в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Результаты замеров запыленности воздуха промышленного эксперимента

	температура, С	разрежение, мм. в. ст.	кол-во аспирационного воздуха, м3/ч	подсосы, %	запыленность, мг/Нм3	кол-во пыли в аспирационном воздухе, г/с	степень очистки, %
перед рукавным фильтром	49	64	10527,322	5,05	8998,016	22,202	98,8
после рукавного фильтра	44	108	10840,952		102,713	0,266	
замеры с предлагаемым устройством:							
перед рукавным фильтром	47	63	10625,548	7,09	5886,50	14,660	98,6
после рукавного фильтра	43	109	11002,224		78,019	0,205	

4.2.3. Расчет экономического эффекта от внедрения предлагаемых решений

Модернизация системы пылегазоочистки связана с дополнительными затратами, поэтому необходимо провести технико-экономическое обоснование. Проведем сравнение изменения экономических показателей с учетом прибыли, от реализации пыли материала, оставшейся в бункере.

В качестве основного экономическо-экологического показателя выступает разница между платежами между базовым и предлагаемым вариантами за так называемый экологический ущерб [162]:

$$\Delta Y = Y_{об.баз} - Y_{об}, \quad (4.15)$$

где $Y_{об}$ – плата за загрязнение окружающей среды, руб.

$$Y_{об} = Y_{отх} - Y_{атм}, \quad (4.16)$$

где $Y_{отх}$ – плата за загрязнения твердыми отходами, руб.; $Y_{атм}$ – плата за загрязнения атмосферы выбросами, руб.

Твердые отходы, следует утилизировать: подвергать уничтожению, складированию или захоронению. При этом вероятно вторичное загрязнение. Экологический ущерб определяется по следующей формуле [162]:

$$Y_{отх} = Z_{отх} + Y_{тер} + Y_{атм}^{6m}, \quad (4.17)$$

где $Z_{отх}$ – плата за утилизацию, руб.; $Y_{тер}$ – плата за занимаемый участок территории, руб.; $Y_{атм}^{6m}$ – плата за вторичное загрязнение, руб.

Плата на утилизацию является суммой затрат на транспортировку и обслуживание оборудования [162, 163, 164]

$$Z_{отх} = (Z_{про} + Z_{зр} \cdot l + C_{отх}) \cdot A_{отх} + E_n \cdot K_{сз}, \quad (4.18)$$

где $A_{отх}$ – количество отходов, т/г.

Экономический ущерб от отторжения площади определяется [54]:

$$Y_{тер} = (Z_{зем}^{3.0} + Z_{рек.зем}) \cdot S_{тер}^-, \quad (4.19)$$

где $Z_{зем}^{3.0}$ – экологическая оценка территории, руб./м², для Белгородской области

$Z_{зем}^{э.о} = 0,0174$ руб./м²; $Z_{рек.зем}$ – затраты на рекультивацию, руб./м, для Белгородской области $Z_{рек.зем} = 17,17$ руб./м²; $S_{мер}^-$ – площадь территории, приходящейся на захоронение или складирование отходов, м²:

$$S_{мер}^- = S_{мер} \cdot A_{отх}, \quad (4.20)$$

где $S_{мер}$ – условная площадь территории, приходящаяся на 1т отходов, м².

Величина вторичного загрязнения зависит от количественной и качественной характеристики выбросов, а также от техники их утилизации [165]:

$$Y_{атм}^{вт} = Y_{уд} \cdot \sigma_{зав.возд} \cdot f \cdot \sum A_i^{возд} \cdot H_{отх.возд} \cdot A_{отх}, \quad (4.21)$$

где $Y_{уд}$ – характеристика удельного ущерба от 1 у.т. загрязняющего вещества, руб./у.т., для Центрального района $Y_{уд} = 49,3$ руб./у.т.; $H_{отх.возд}$ – норма поступления загрязняющего вещества, т/т.

При расчете учитывается относительную опасность, которая зависит от вида территории зоны активного загрязнения (ЗАЗ) [166]. Для промышленных узлов показатель относительной опасности составляет $\sigma_{зав.возд} = 30$.

Поправки на характер рассеивания вредных выбросов [163]:

$$f = \frac{100}{100 + \varphi h} \cdot \frac{V}{1 + V}, \quad (4.22)$$

где h – геометрическая высота, м; V – скорость преобладающего направления ветра, м/с; φ – коэффициент учета подъема источника выбросов:

$$\varphi = 1 + \frac{\Delta T}{75}, \quad (4.23)$$

где ΔT – среднее значение разности температур источника и окружающей среды, °С.

Относительная агрессивность вредных веществ вентиляционных выбросов определяется по формуле [163]:

$$A_i^{возд} = a_i \cdot \alpha_i \cdot \delta_i \cdot \lambda_i \cdot \beta_i, \quad (4.24)$$

где a_i - опасность для человека:

$$a_i = \left(\frac{60}{\text{ПДК}_{\text{сум}} \cdot \text{ПДК}_{\text{р.з.}}} \right)^{0,5}, \quad (4.25)$$

α_i - коэффициент накопления вредных веществ и последующего воздействия на человека, $\alpha_i = 1$; δ_i - коэффициент вредного действия $\delta_i = 1$; λ_i - коэффициент, учитывающий вторичное попадание в окружающую среду, $\lambda_i = 1$; β_i - коэффициент учитывающий возможность формирования более опасных загрязнений, $\beta_i = 1$.

Таким образом плата за загрязнение окружающей среды составит [162]:

$$Y_{\text{атм}} = Y_{\text{уд}} \cdot \sigma_{\text{заз.возд}} \cdot f \cdot \sum A_i^{\text{гозд}} \cdot A_{\text{выб}}, \quad (4.26)$$

где $A_{\text{выб}}$ - количество поступающего в воздух, т/год.

Разность удельных затрат за загрязнение модернизированного и базового варианта с учетом прибыли, получаемой от реализации материала, составит годовой эколого-экономический эффект [162]:

$$\mathcal{E}_2 = Z_{\text{баз}}^2 - Z^2 + \Pi. \quad (4.27)$$

Приведенные затраты составят:

$$Z^2 = Z + Y = C_{\text{сз}} + E_{\text{н}} \cdot K_{\text{сз}} + Y_{\text{об}}, \quad (4.28)$$

где $C_{\text{сз}}$ - плата за утилизацию и выброс загрязняющих веществ, руб.:

$$C_{\text{сз}} = C_{\text{сз отх}} + C_{\text{сз выб}}, \quad (4.29)$$

где $C_{\text{сз отх}}$ - плата за утилизацию, руб.; $C_{\text{сз выб}}$ - за выбросы в окружающую среду, руб.

$$C_{\text{сз отх}} = C_{\text{отх}} \cdot A_{\text{отх}}, \quad (4.30)$$

$$C_{\text{сз выб}} = C_{\text{выб}} \cdot A_{\text{выб}}, \quad (4.31)$$

где $A_{\text{выб}}$ - массовая характеристика выброса загрязняющих веществ в атмосферу, т/год.

С учетом [162] и (4.28) расчет эколого-экономического эффекта (4.27)

принимает вид:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_2 &= Y_{об.баз} + C_{сз.баз} + E_n \cdot K_{сз} - (C_{сз} + E_n \cdot K_{сз} + Y_{об}) + \Pi, \\ \mathcal{E}_2 &= C_{сз.баз} - C_{сз} + \Delta Y + \Pi,\end{aligned}\quad (4.32)$$

где Π – прибыль от реализации материала, оставшегося в производстве после модернизации, руб.

$$\Pi = \Pi \cdot A_{ул}, \quad (4.33)$$

где Π – стоимость 1т цемента, руб./т; $A_{ул}$ – количество пылевых частиц, захваченной пылеуловителем, т/год.

К капитальным затратам относятся плата за оборудование, его доставку и монтаж, а также другие расходы, связанные с внедрением проекта:

$$K_{сз} = K_2 + K_3 + K_4, \quad (4.34)$$

где K_2 – стоимость оборудования, руб.; K_3 – стоимость инвентаря, руб.; K_4 – прочие затраты, руб.

Целесообразность капитальных затрат на модернизацию систем пылегазоочистки определяется по показателю абсолютной экономической эффективности капитальных вложений [162]:

$$\mathcal{E}_{сзк} = \frac{\Delta Y - C_{сз}}{K_{сз}}. \quad (4.35)$$

Данный показатель должен превышать значение нормативного показателя, т.е. $\mathcal{E}_{сзк} > 0,15$. Основные показатели данного расчета сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3.

Экономический эффект от внедрения на ЗАО «Белгородский цемент»

Затраты на уничтожение отходов, руб.	25678,18
Экономический ущерб от отторжения площади, руб.	103,472
Ущерб от вторичного загрязнения атмосферы, руб.	39,8724
Ущерб от загрязнения атмосферы, руб	4358,847
Ущерб от неутилизированных отходов, руб.	26267,53
Общий ущерб	30626,37
Предотвращенный ущерб	92343,5
Коэффициент экономической эффективности	0,413
Экономический эффект	222970

4.3. Обеспыливание бункеров цеха водосодержащих эмульсий

4.3.1 Характеристика условий производства

Основными источниками вредных выделений (пылей компонентов сырья) данного цеха являются процессы загрузки сырья в диссольверы приготовления шпаклевок, диссольверы приготовления водосодержащих красок и загрузка сырья в передвижной бункер.

Для локализации пылевых выделений от технологического оборудования емкостного типа (рисунок 4.5) целесообразно использование местных вентиляционных отсосов. Данные технологические операции происходят периодически, время проведения определяется техническим регламентом производства. Суммарное время загрузочных операций значительно меньше времени, затрачиваемого на процесс приготовления продукции, следовательно, приоритетным является локализация пылевых выделений от оборудования во время загрузки сырья. Как следует из технологического регламента, одновременно может производиться загрузка не более чем 4-х единиц оборудования, таким образом, максимальная нагрузка на обеспыливающую систему вентиляции (аспирации) складывается из производительности местных отсосов от узла загрузки мобильного бункера и 3-х диссольверов с максимальным расходом удаляемого воздуха.



Рисунок 4.5. Общий вид запыленного цеха

Локализация пылевых выделений от мест загрузок и перегрузок сыпучего сырья

производится путем устройства полужакрытых отсосов (для диссольверов шпаклевки «ПБ» и узла загрузки мобильного бункера) и отвода воздуха из объемов рабочих емкостей (для диссольверов водосодержащих красок). Объемы аспирации обеспечивает удаление воздуха, поступающего с загружаемым материалом по желобу и поступающего через неплотности, при условии поддержания в месте загрузки требуемого разряжения. Удаление воздуха от каждого источника пыления производится во время загрузки материалом за счет периодического подключения местного отсоса к местной вытяжной системе. Для обеспечения периодического удаления воздуха от аспирационных отсосов каждый из них соединяется отдельной веткой воздухопровода с коллектором рукавного фильтра. На каждой ветви устанавливается запорный клапан с приводом, оснащенный концевыми датчиками.

Для удаления других производственных вредностей в цехе (углекислый газ, влажность, температура) предусмотрена общеобменная вытяжная вентиляция. Общеобменная вытяжная вентиляция удаляет воздух из верхней части помещения в осях 4-8 вдоль стены по оси А как из наиболее запыленной части помещения. Вентилятор вытяжной общеобменной вентиляции размещается за пределами обслуживаемого помещения на перекрытии цеха. Объем удаляемого воздуха – 4 000 м³/час.

Подача воздуха в помещение цеха осуществляется в количестве, компенсирующем удаление воздуха общеобменной и местной вытяжной вентиляцией. Подача воздуха осуществляется из верхней зоны помещения в осях 4-8 вдоль стены по оси В направленными струями вниз и по направлению площадки на отм. +2.300. Верхняя раздача воздуха является целесообразной в связи с низким уровнем тепловой напряженности технологического процесса (менее 50 Вт/м³). Подготовка приточного воздуха осуществляется в приточной камере, и заключается в фильтрации воздуха и нагреве его в холодный и переходный периоды года.

Воздуховоды системы общеобменной вентиляции изготавливаются из оцинкованной стали, толщина стали определяется в соответствии с требованиями СП 60.13330.2016. Воздуховоды местной вытяжной вентиляции выполняются из листовой стали толщиной 1,25 мм.

Воздуховоды местной вытяжной вентиляции размещаются в верхней части цеха вдоль выступающих конструкций перекрытия и над проходом вдоль стены по оси В. Воздуховоды общеобменной вентиляции размещаются и закрепляются вдоль стен по оси А для вытяжной системы и по оси В – для приточной системы.

Для управления распределением воздушных потоков в системе аспирации вблизи каждой обслуживаемой установки размещается блок выключателей с сигнализаторами загруженности системы аспирации. Перед загрузкой сырьевых материалов оператор-загрузчик включает соответствующий местный отсос на блоке выключателей. При включении соответствующего местного отсоса вентилятор системы аспирации выходит на соответствующие нагрузке данного отсоса обороты вращения, при включении следующего местного отсоса, в зависимости от его проектной производительности, вентилятор переходит на частоту вращения, обеспечивающую одновременное удаление воздуха от всех включенных отсосов. При достижении системой аспирации максимальной проектной производительности блокируется включение дополнительных отсосов и включается визуальная сигнализация достижения предельной нагрузки.

4.3.2 Описание предлагаемого решения и результатов

Для обеспечения требуемого норматива по концентрации пыли в воздухе рабочей зоны предложено несколько технических решений.

Объем возимого бункера (рисунок 4.6) следует увеличить для того, чтобы конус материала при максимальной загрузке был ниже верхней кромки стенок бункера. Этого можно достичь при сохранении габаритов, сделав его квадратным в сечении. К раме возимого бункера снизу приварить сплошное днище для создания лучшего уплотнения при выгрузке в диссоolver. Загрузочное отверстие на эстакаде (отметка +2,300) снабдить наклонным желобом до отметки верхней кромки возимого бункера. Для снижения взметывания материала обеспечить формирование коандовского течения за счет установки элементов устройства для снижения пылеобразования. Защитную решетку в отверстии опустить. Под загрузочным отверстием установить бункерообразное укрытие с жесткими и гибкими уплотнителями. Укрытие снабдить аспирационным отсосом.

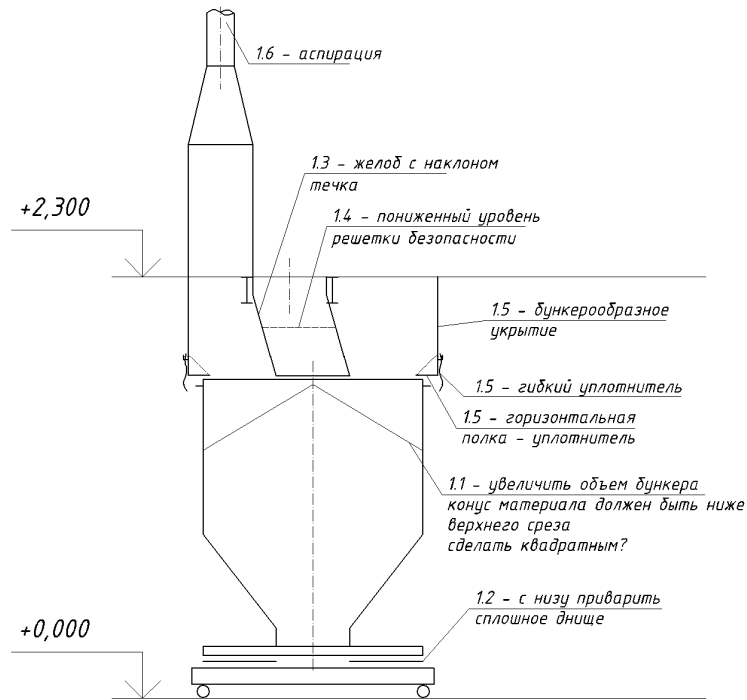


Рисунок 4.6. Мобильный бункер

Для загрузки диссольверов (рисунок 4.7.) для производства красок часть открывающейся крышки заменить аспирационной воронкой, в загрузочный проем установить устройство, формирующее коандовское течение. Диссольверы объединить переточными каналами с наклонными стенками для уменьшения пылевых отложений и лючками для их осмотра и очистки.

При выгрузке возимого бункера закрывать его гибкой или сдвижной крышкой, позволяющей контролировать опорожнение бункера.

Систему аспирационных воздуховодов снабдить автоматическими клапанами, позволяющими производить удаление аспирационного воздуха через преточные каналы из ближайшего соседнего диссольвера с закрытой крышкой.

Расход воздуха, удаляемого системой аспирации, составляет $5760 \text{ м}^3/\text{ч}$ или $1,6 \text{ м}^3/\text{с}$, поэтому допустимая концентрация пыли в выбрасываемом в атмосферу воздухе равна, $\text{г}/\text{м}^3$:

$$A_{\text{kd}} = (160 - 14,4 \cdot Q_n) \cdot k_b \cdot 10^{-3} = (160 - 14,4 \cdot 1,6) \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,14 ,$$

где Q_n - объемный расход выбрасываемого воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; k_b - коэффициент, учитывающий фиброгенную активность пыли, для пылей с ПДКр.з. = $10 \text{ мг}/\text{м}^3$ равен 1.

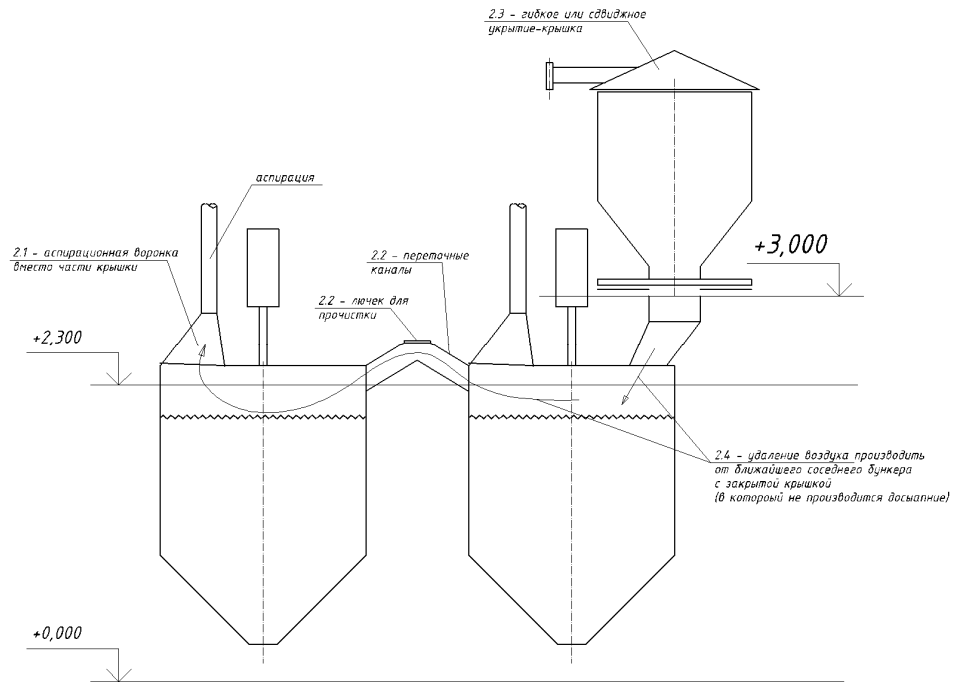


Рисунок 4.7. Система вентиляции диссольтеров

Тогда требуемая степень очистки удаляемого воздуха от пыли перед выбросом в атмосферу составит, %:

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{A_n - A_{\text{kd}}}{A_n} \cdot 100 = \frac{10 - 0,14}{10} \cdot 100 = 98,6 \%$$

Данным требованиям удовлетворяет рукавный фильтр КФЕ-70 с заявляемой производителем степенью очистки не менее 99,8% для частиц пыли более 2 мкм при максимальной остаточной запыленности на выходе из фильтра не более 10 мг/м³.

В системе используются 2-х дюймовые клапана. При срабатывании клапан выбрасывает 200 л сжатого воздуха за импульс; длительность импульса 100-150 мс.; минимальное время между соседними импульсами – 6 сек. Длительность импульса и время между импульсами регулируется при отладке рукавного фильтра.

В настоящее время элементы системы регенерации оптимизированы таким образом, что позволяют обеспечить эффективную работу системы при давлении сжатого воздуха от 0.5 МПа (в частности, оптимизированные геометрические отношения конфузоров каркасных сеток рукавов и импульсных труб).

Установление требуемых расходов воздуха в системах вентиляции

осуществляется регулируемыми клапанами при пусконаладке.

Положительным эффектом от внедрения предложенных систем местной вентиляции для диссольтверов шпаклевки «ПБ» и узла загрузки мобильного бункера является снижение запыленности на рабочих местах непосредственно у указанных аппаратов с 15,59 мг/м³ до 8,48 мг/м³, что подтверждает акт о внедрении (приложение К).

4.3.3 Расчет экономического эффекта

Разработка и внедрение мероприятий для создания безопасных условий труда, направленных на сокращение возникновения профессиональных заболеваний и случаев травматизма, являются обязательными. Такие мероприятия обеспечат снижение экономических потерь от утраченного рабочего дня, особенно в условиях растущих затрат на лечения больного.

Социально-экономический эффект от модернизации системы вентиляции, определяется разностью между снижением материального ущерба и затратами, необходимыми на их введение в деятельность [104]:

$$\mathcal{E}_{от} = \sum M - \frac{\Delta K_{\epsilon} + \Delta K_{м} - C_{н}}{T_{о}}. \quad (4.36)$$

где $\sum M$ – снижение ущерба от травматизма и заболеваемости; ΔK_{ϵ} – затраты на охрану труда; $\Delta K_{м}$ – дополнительные капиталовложения на новые материалы; $C_{н}$ – затраты на НИР и ОКР, включая авторский надзор; $T_{о}$ – нормативный срок окупаемости.

Составляющими материального ущерба являются: убыток от травматизма на производстве $M_{тп}$; убыток от профессиональных болезней $M_{нб}$; убыток от нетрудоспособности при общей заболеваемости $M_{об}$.

Убыток от временной нетрудоспособности работника $У$, руб. можно рассчитать по формуле:

$$У = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (4.37)$$

где C_1 – потерянный доход; C_2 – пособия, по листкам нетрудоспособности; C_3 – затраты на стационарное лечение; C_4 – затраты на амбулаторное лечение.

Потерянный доход от работника в период нетрудоспособности:

$$C_1 = V_{\text{дн}} \cdot D_3 \quad (4.38)$$

где $V_{\text{дн}}$ – дневная выработка; D_3 – число потерянных дней.

Затраты по листкам нетрудоспособности:

$$C_2 = B_{\text{л}} \cdot D_{\text{н}} \quad (4.39)$$

где $B_{\text{л}}$ – средняя плата по листку нетрудоспособности; $D_{\text{н}}$ – число рабочих дней.

Средства, затраченные на стационарное лечение:

$$C_3 = C_{\text{к}} \cdot D_{\text{сл}}, \quad (4.40)$$

где $C_{\text{к}}$ – средняя стоимость; $D_{\text{сл}}$ – длительность лечения.

Затраты на амбулаторное лечение:

$$C_4 = (P_1 C_{\text{в}} + P_2 C_{\text{д}}) B_{\text{а}}, \quad (4.41)$$

где P_1 – среднее число посещений, приходящееся на один случай потери трудоспособности; $C_{\text{в}}$ – средняя стоимость посещения; P_2 – среднее число обследований; $C_{\text{д}}$ – средняя стоимость одного обследования; $B_{\text{а}}$ – количество больных.

Затраты на амбулаторное лечение можно определить по формуле:

$$A_1 = P_1 C_{\text{в}} + P_2 C_{\text{д}}. \quad (4.42)$$

Социально-экономический эффект составит, руб/год:

$$\mathcal{E} = (V_{\text{дн}} + B_{\text{л}}) D_{\text{э}} - (C_{\text{м}} + C_{\text{т}}), \quad (4.43)$$

где $V_{\text{дн}}$ – средняя выработка; $B_{\text{л}}$ – средняя плата листка нетрудоспособности; $D_{\text{э}}$ – число снижения дней нетрудоспособности; $C_{\text{т}}$ – затраты на модернизацию; $C_{\text{м}}$ – затраты на работу медицинского кабинета.

Сведем расчет социально-экономического эффекта от модернизации систем вентиляции перегрузок порошковых материалов сведем в табл. 4.4.

Социально-экономический эффект от модернизации систем вентиляции

Предотвращенный ущерб, руб.	32569
Лечение в амбулаторных условиях, руб./чел.	7651
Социально-экономический эффект, руб./год	67806

4.4. Выводы к главе 4

1. Разработаны рекомендуемые схемы систем вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов, обеспечивающие снижение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе за счет включения в конструкцию узла пневмотранспортной загрузки устройства для снижения пылеобразования. В результате чего обеспечивается снижение пылеобразования при соударении струи пылящего материала о слой ранее складированного, а также использования в качестве первой ступени очистки полости бункеров, за счет организации воздушных потоков.

2. Уточнена методика расчета систем местной вентиляции бункеров с учетом использования устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов.

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

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

По итогам диссертационного исследования получены следующие результаты.

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

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

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

4. Разработана математическая модель воздушного течения в загрузочном узле бункера в программном комплексе SolidWorks. Путем сравнения натурных и вычислительных экспериментов установлены достоверность и адекватность расчетных полей скоростей, формируемых предложенным устройством для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих веществ. Определены

эффективные режимы работы устройства, обеспечивающие формирование коандовского течения у крышки бункера.

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

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

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

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

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

Благодаря проведенным исследованиям даны практические **рекомендации** по повышению эффективности систем вентиляции при пневмотранспортной загрузке сыпучих материалов, выражающееся в снижении концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе, а соответственно и в вентиляционных выбросах

от бункеров за счет формирования в загрузочном узле коандовских течений.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюшинский И.В., Кононов И.В., Денисов В.В. Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах. Самара: СамГАПС, 2003. 232 с.
2. Нейков О.Д., Логачев И.Н. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков. Москва: Металлургия, 1981. 192 с.
3. Павлов В.Н. Обеспыливающая вентиляция элеваторов и складов. Москва: Колос, 1967. 224 с.
4. Евстифеев В.Н. Трубопроводный транспорт пластинчатых и сыпучих материалов в строительстве. Москва: Стройиздат, 1989. 248 с.
5. Гячев Л.В. Основы теории бункеров. Новосибирск: НГУ, 1992. 148 с.
6. Василевский М.В., Романдин В.И., Зыков Е.Г. Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов: монография. Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2013. 136 с.
7. Кузнецов Ю.М. Пневмотранспорт: теория и практика. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 171 с.
8. Шваб В.А. Аэромеханические методы в технологии производства порошковой продукции. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. 161 с.
9. Барский М.Д., Дроздов Б.С., Павлов В.И. Пневмотранспорт, пылеулавливание и сепарация. Свердловск: Изд-во УПИ, 1979. 95 с.
10. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. Ленинград: Химия, 1984. 104 с.
11. Дуда В.Г. Цемент, электрооборудование, автоматизация, хранение, транспортирование. Справочное пособие. Москва: Стройиздат, 1987. 374 с.
12. Люсов А.Н. Техника и экономика сухого способа производства цемента в СССР и за рубежом. Обзорная информация ВНИИЭСМ, 1971. 69 с.
13. Wirthwein R., Scharf K.F. Betriebserfahrungen mit der Vorcalcinieranlage im Zementwerk Rudersdorf // Zement-Kalk-Gips, Vol. 53, No. 1, 2000. pp. 46-54.
14. Юдин Н.М. Комплексное решение вопросов охраны труда и защиты окружающей среды // Цемент, № 9, 1980. С. 7-8.
15. Коробова О.С., Ткачева А.С. Экологические аспекты цементного

производства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), № 7, 2016. С. 42-46.

16. Классен В.К. Рациональное развитие технологии цемента в России // Технологии бетонов, № 2 (91), 2014. С. 23-25.

17. Сравнительные технико-экономические показатели сухого и мокрого способов производства портландцемента, 06.03-19М.195, 2006.

18. Россошанский В.В. Совершенствование систем обеспыливающей вентиляции в производстве цемента, ГОУВПО "Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет", Волгоград, диссертация. кандидата технических наук : 05.23.03 2007.

19. Гробов А.Б., Артюхин А.С., Азаров Д.В. Расчет фракционной эффективности пылеулавливающего оборудования // Наука і освіта 2005: Екологія. Дніпроперовськ. 2005. Т. 17. С. 12-14.

20. Шевляков В., Филонюк А., Рыбина М., Чернышова В., Кардаш Ф., Эрм И., Буйницкая А.В., Студеничник С. Состояние здоровья работников биотехнологических производств // Вестник ВГМУ, № 3, 2014. С. 127-138.

21. Энтин З.Б., Сивков С.П. Проблемы технического регулирования и охраны окружающей среды при производстве цемента. Часть I. Безопасность цемента и охрана окружающей среды // Цемент и его применение, № 6, 2007. С. 118-122.

22. Остроухих А.В., Вэй П.А., Суркова Н.Е. Анализ современного состояния автоматизации процесса производства сухих строительных смесей // Механизация строительства, № 7 (841), 2014. С. 59-63.

23. Чертов В.Г. Оборудование и процессы мобильных пневмотранспортных установок, Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова, Белгород, автореферат дис.. кандидата технических наук : 05.02.13 2010.

24. Боглаев В.И., Россошанский В.В., Тетерев М.В. Совершенствование систем обеспыливающей вентиляции // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит., № 6 (21), 2006. С. 154-156.

25. Аблакулова Ю.Х., Василевский М.В. Совершенствование систем

транспортировки сыпучих материалов и очистки воздуха в цементном производстве, Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности (ЭБЖ), Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, дипломный проект 2016.

26. Бобровников Н.А. Защита окружающей среды от пыли на транспорте. Москва: Транспорт, 1984.

27. Семенов А.М., Константинов А.Ф. Фильтрация воздуха при ударе струи сыпучего материала о плоскость // В кн.: Проблемы технологии, механизации и автоматизации перегрузочных работ на морском транспорте. Ленинград: Ленморниипроект, 1984. С. 12-15.

28. Ларин Ю.А. Исследование методов борьбы с пылеобразованием при погрузке порошкообразных материалов в трюмы судов, Ленинград, дис. канд. техн. наук: 05.22.19 1973.

29. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации: монография. Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. 659 с.

30. Минко В.А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов. Воронеж: ВГУ, 1981. 175 с.

31. Минко В.А., Логачев И.Н., Логачев К.И., Пузанок А.И., Подпоринов Б.Ф., Овсянников Ю.Г., Минко А.В., Татаренко Н.В., Алифанова А.И. Обеспыливающая вентиляция: монография. Белгород: БГТУ, 2006. 460 с.

32. Минко В.А., Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Шумилов Р.Н., Ильина Т.Н., Староверов С.В., Феоктистов А.Ю., Феоктистов Ю.А., Шаптала В.Г. и др. Обеспыливающая вентиляция. Т. 2. Белгород: БГТУ, 2010. 565 с.

33. Самсонов В.Т. Обеспыливание воздуха в промышленности: методы и средства: монография. Москва: ИНФРА-М, 2016. 234 с.

34. Сервацка З. Отдельные рекомендации по предотвращению пыления массовых сыпучих грузов // Научные труды Морской институт ПНР. 1981. Т. 662. С. 142 - 149.

35. Сухарева А.И. Вентиляция и пневмотранспорт в полиграфии. Москва: Книга, 1971. 30 с.

36. Отделкин Н.С., Отделкин М.С. Прогнозирование пылеобразования при перегрузке пылящих материалов грейферными кранами на основе подобия и моделирования // Научные труды Горьковского института инженерного водного транспорта, Т. 283, № 4, 1999. С. 108-116.

37. Отделкин Н.С. Прогнозирование пылеобразования при различных способах перегрузки пылящих навалочных материалов в морских и речных портах // Вестник Волжская гос. академия водн. трансп. «Надежность и ресурс в машиностроении», Т. 4, 2003. С. 107 — 120.

38. Самсонов В.Т. Об изучении на моделях явления пылеобразования при падении пылящих материалов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, Т. 6, 1964.

39. Степанов А.Л. Портовое перегрузочное оборудование. Москва: Транспорт, 1996. 328 с.

40. Обухов А.М. О распределении энергии в спектре турбулентного потока // «Изв. АН СССР»: Серия географическая и геофизическая, № 4-5, 1941.

41. Hinds W.C. Size characteristics of cigarette smoke // American Industrial Hygiene Association Journal, Vol. 38, No. 1, 1978. pp. 48–54.

42. Vu Duc. Measurements of pollutants emitted during manual arc welding with coated electrodes in an experimental chamber // Staub, Vol. 43, No. 2, 1983. pp. 55–57.

43. Кирпичев М.В. Теория подобия. Москва: Академия наук СССР, 1953. 182 с.

44. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. Москва: Гостехиздат, 1981. 375 с.

45. Веников В.А. О моделировании. Москва: Знание, 1974. 89 с.

46. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. Москва: Наука, 1976. 146 с.

47. Алабужев П.М. Теория подобия и размерности. Москва: Наука, 1968. 146 с.

48. Беннет К.О., Майерс Д.Е. Гидродинамика, теплообмен и массообмен. Москва: Наука, 1985. 726 с.

49. Клайн Д.С. Подобие и приближенные методы. Москва: Мир, 1968. 241 с.

50. Doule K., Szeszynski A. Transportation and handling of Western Canadian

sulphur for the export market // Sulphur, No. 139, 1978. pp. 26 - 31.

51. Meyer F. Crusting agest minimize loss of coal ins transit // Reilway Age, 1982. pp. 26-31.

52. Самсонов В.Т. Об изучении на моделях явления пылеобразования при падении измельченных материалов // В кн.: Научные труды ин-та охраны труда ВЦСПС. Москва: Профиздат, 1974. С. 89-96.

53. Калягин В.А. Меестные вентиляционные устройства составных цехов стекольных заводов. Москва: Профиздат, 195.

54. Сатарин В.И., Перли С.Б. Движение и обеспыливание газов в цементном производстве. Москва: Госстройиздат, 1960. 309 с.

55. Зайончиковский Я. Обеспыливание в промышленности. Москва: Стройиздат, 1969. 350 с.

56. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. Москва: Химия, 1981. 390 с.

57. Банит Ф.Г., Мальгин А.Д. Пылеулавливание и очистка газа в промышленности строительных материалов. Москва: Стройиздат, 1979. 351 с.

58. Алиев Г.М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок. Москва: Металлургия, 1988. 368 с.

59. Балтренас П.Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов. Москва: Стройиздат, 1990. 182 с.

60. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. Ленинград: Химия, 1990. 288 с.

61. Бутаков С.Е. Аэродинамика систем промышленной вентиляции. Москва: Профиздат, 1949.

62. Вальдберг А.Ю. Технология пылеулавливания. Ленинград: Машиностроение, 1985. 192 с.

63. Гримитлин М.И. Состояние и перспективы очистки промышленных выбросов в атмосферу на машиностроительных предприятиях // Науч. тр. ЛДНТП «Современные способы очистки вредных выбросов в атмосферу». С.Пб. 1991. С. 6-7.

64. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Ленинград: Химия, 1982. 285 с.
65. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. Москва: Стройиздат, 1981. 296 с.
66. Старк С.Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. Москва: Металлургия, 1977. 328 с.
67. Страус В. Промышленная очистка газов. пер. с англ.-е изд. Москва: Химия, 1981. 616 с.
68. Гордон П.М., Пейсахов И.Л. Контроль пылеулавливающих установок. Ленинград: Metallurgizdat, 1956.
69. Василевский М. Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 258 с.
70. Руководящие технические материалы. Пневмотранспорт сыпучих материалов (гранулированных и порошкообразных) взвесью, с поршневой структурой и сплошным потоком материала, МХП СССР, Томск, 1987.
71. Махова О.Г., Пантелеева Н.М. Определение химического и дисперсного составов цементной пыли // Научно-технический сборник. Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, № 60, 2005. С. 119-123.
72. Коломоец М.И., Севриков В.В., Васютенко А.П. Исследование дисперсного состава пыли цементных производств // Вісник СевНТУ. Вип. 106: Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр., 2010. С. 197-202.
73. Трибрат В.В. Обеспыливание аспирационных выбросов дробильных отделений цементных заводов в зернистых фильтрах с импульсной регенерацией, Киев, Автореф. дис.канд.тех.наук 1990.
74. Мазус М.Г., Мальгин А.Д., Моргулис М.Л. Фильтры для улавливания промышленных пылей. Москва: Машиностроение, 1985.
75. Пирумов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. Москва: Госстройиздат, 1961.
76. Данюшевский СИ, редактор. Справочник по проектированию цементных заводов. Ленинград: Изд-во литературы по строительству, 1969. 237 с.
77. Крашенинников Н. Проектирование цементных и асбестоцементных

заводов. Москва. 1966.

78. Ведомственные нормы технологического проектирования цементных заводов, Концерн «Цемент», СПб, ВНТП-06-91, 1991.

79. Зубарева О.Н. Разработка струйно-инерционных пылеуловителей для предприятий стройиндустрии, Нижний Новгород, автореферат дис.. кандидата технических наук : 05.23.03 1995.

80. Голованова Л.В. Общая технология цемента. Москва: Стройиздат, 1984. 118 с.

81. Слюсаренко В.Г., Исаев В.П., Лапшин А.Е., Гацкий А.К. Хранилище для сыпучих материалов с пневмотранспортной загрузкой, Патент РФ 2046963, Oct 04, 1991.

82. Горюшинский И.В. Эффективное заполнение емкостей в транспортно-технологических системах. Самара: СамГАПС, 2008. 138 с.

83. Мосина Н.Н. Совершенствование загрузки хранилищ и подвижного состава сыпучими грузами (на примере зерновых грузов и продуктов помола), С. Петербург-Пушкин, Дисс..канд. техн. наук. 2004.

84. Красников В.В. Подъемно-транспортные машины. Москва: Колос, 1981. 263 с.

85. Шевандина В.М. Разработать технологию бестарной отгрузки, транспортировки железнодорожным транспортом, приема и складирования премиксов, ВНИИКП, Воронеж, Отчет о НИР (заключ.) ГР 0189000830; Инв. №02900054441, 1990.

86. Боумане Г. Эффективная обработка и хранение зерна. Перевод с английского В.И. Дашевского-е изд. Москва: Агропромиздат, 1991. 608 с.

87. Обермейстер АМ, редактор. Комплексная механизация погрузо-разгрузочных работ на транспорте. Москва: Транспорт, 1977. 17 с.

88. Таймер О.Ф. Аварии железобетонных силосов зерновых элеваторов // Конструирование и технология машиностроения, Т. 91, № 2 серия В, 1969. С. 181.

89. Кузьменко В.Н. Выбор конструктивной схемы кузова вагона для перевозки порошкообразных грузов и оценка напряженного состояния его

основных элементов, Москва, Автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. : 05.05.01 1982.

90. Морозов В.Г., Горбачев А.В., Дубинчук А.Н., Наремский Н.К. Устройство для перегрузки сыпучего материала, а.с. 1615082 SU, Sep 27, 1987.

91. Феликсов В.М., Федотова Т.В., Лайко М.Ю. Гравитационный спуск, а.с. 1557021 SU, Jul 07, 1988.

92. Устинов Б.С., Устинов Д.Б. Устройство для транспортирования сыпучих материалов, а.с. 1742169 SU, Mar 27, 1989.

93. Семеновский В.И., Родин С.Б., Воробьев В.Н., Великоредчанина Н.С. Устройство для распределения сыпучего материала в бункере, а.с. 1381039 SU, Sep 03, 1986.

94. Завьялов Ю.И. Устройство снижения пылеобразования, Патент РФ 2185316, Jul 24, 2000.

95. Килин П.И. Аспирация бункеров и емкостей при загрузке сыпучих материалов пневмотранспортом // Цветная металлургия, № 2-3, 200. С. 38-40.

96. Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Падва В.Ю., Русанов А.А., Урбах И.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию. Москва: Энергоатомиздат, 1983.

97. Руководство по расчету воздухопроводов из унифицированных деталей АЗ-804. Москва: Госстрой СССР, 1979.

98. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Энергосбережение в аспирации: теоретические предпосылки и рекомендации. М. - Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2013. 504 с.

99. Trancossi M. An Overview of Scientific and Technical Literature on Coanda Effect Applied to Nozzles, SAE Technical Papers 259, 2011.

100. Coanda H. Improvement in Propellers, US Patent 1104963, 1911.

101. Coanda H. Lifting Device Coanda Effect, US Patent 3261162, 1936.

102. Coanda H. Cyclone Separator, US 2796147 A, 1957.

103. Coanda H. Device for Deflecting a Stream of Elastic Fluid Projected into an Elastic Fluid, US Patent 2052869, 1936.

104. Coanda H. Apparatus for Imparting Rapid Speed to a Mass of Fluid, US Patent 2907557.
105. Столер В.Д. Основы организации и расчета вентиляционных процессов, сопровождающихся эффектом Коанда, Уральск. политехн. ин-т им. С. М. Кирова, Свердловск, Деп. в ВИНТИ 16.04.87 № 1317-B87, 1987. 138 с.
106. Хзмалян Д.М. Теория топочных процессов. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
107. Франк А.М. Дискретные модели несжимаемой жидкости. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 224 с.
108. Wille R., Fernholz H. Report on the First European Mechanics Colloquium // Journal of Fluid Mechanics, No. 23, 1965. pp. 801-819.
109. Pascoa J., Trancossi M., Tacchini A., Ilieva G., Madonia M. Acheon Project: A Novel Vectoring Jet Concept // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Houston, Texas, USA. 2012. Vol. Volume 1: Advances in Aerospace Technology. pp. 499-508.
110. Маркович Д.М. Гидродинамическая структура ограниченных струйных течений, Ин-т теорет. и прикладной механики СО РАН, Новосибирск, автореферат дис.. доктора физико-математических наук : 01.02.05 2003.
111. Залманзон Л.А. Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем. Москва: Наука, 1973. 464 с.
112. Шальнев К.К., Чернявский Б.А., Демидов Ю.С. О механизме прилипания струи к стенке струйного усилителя - эффект Коанда // ДАН, Т. 175, № 1, 1967. С. 55-58.
113. Brown F.T. A Combined and Experimental Approach to the Development of Fluid Jet Amplifiers // Trans. ASME, Vol. 86, No. 2, 1964.
114. Olson R.F., Atoeffler R.C. Analytical method for predicting power jet reattachment characteristics in wall-attachment-type fluidic devices // Advances in fluidics, 1967. pp. 177-186.
115. Newman B.G. The deflection of jets by adjacent boundaries - Coanda effect // Boundary Layer and Flow Control. Oxford. 1961. Vol. 1. pp. 232-264.

116. Bourque C., Newman B.G. Reattachment of a two-dimensional incompressible jet to the Adjacent flat plate // *Aeronautical Quarterly*, No. 11, 1960.
117. Carpenter P.W., Green P.N. The Aeroacoustics and Aerodynamics of High-Speed Coanda Devices, Part 1: Conventional Arrangement of Exit Nozzle and Surface // *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 208, No. 5, 1997. pp. 777-801.
118. Bradshaw P. Effects of Streamline Curvature on Turbulent Flow, AGARDograph, AGARDograph AG-169, 1990.
119. Patankar U.M., Sridhar K. Three-Dimensional Curved Wall Jets // *Journal of Basic Engineering* (changed to *Journal of Engineering Materials and Technology*; and the *Journal of Fluids Engineering*), Vol. 94, No. 2, 1972. pp. 339-344.
120. Rask R.B. An Experimental Study of Two-Dimensional and Three-Dimensional Curved Wall Jets, University of Minnesota, Ph.D. Thesis 1973.
121. Gregory-Smith D.G., Senior P. The Effects of Base Steps and Axisymmetry on Supersonic Jets over Coanda Surfaces // *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 15, No. 4, 1994. pp. 291-298.
122. Cornelius K.C., Lucius G.A. Physics of Coanda Detachment at High-Pressure Ratio // *Journal of Aircraft*, Vol. 31, No. 3. pp. 591-596.
123. Fekete G.I. Coanda Flow of a Two-Dimensional Wall Jet on the Outside of a Circular Cylinder, Mechanical Engineering Research Laboratories, McGill University, Tech. Rept. 63-11, 1963.
124. Giles A., Hays A.P., Sawyer R.A. Turbulent Wall Jets on Logarithmic Spiral Surfaces // *The Aeronautical Quarterly*. pp. 201-215.
125. Guitton D.E., Newman G. Self-Preserving Turbulent Wall Jets over Convex Surfaces // *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 81, No. 1, 1977. pp. 155-185.
126. Newman B.G. The Prediction of Turbulent Jets and Wall Jets // *Canadian Aeronautics and Space Journal*, Vol. 15, 1969. pp. 287-305.
127. Neuendorf R., Wygnanski I. On a Turbulent Wall Jet Flowing over a Circular Cylinder // *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 381, 1999. pp. 1-25.
128. Bevilaqua M., Lee D. Design of Supersonic Coanda Jet Nozzles // *Proceedings of the Circulation-Control*, Vol. Workshop 1996, 1996.

129. Gregory-Smith G., Gilchrist R. The Compressible Coanda Wall Jet - an Experimental Study of Jet Structure and Breakaway // International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 8, No. 2, 1987. pp. 156-164.
130. Gilchrist R., Gregory-Smith G. Compressible Coanda Wall Jet - Predictions of Jet Structure and Comparison with Experiment // International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 9, No. 3, 1988. pp. 286-295.
131. Carpenter P.W., Green P.N. The Aeroacoustics and Aerodynamics of High-Speed Coanda Devices, Part 1: Conventional Arrangement of Exit Nozzle and Surface // Journal of Sound and Vibration, Vol. 208, No. 5, 1997. pp. 777-801.
132. Juvet J.D. Control of High Reynolds Number Round Jets, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Ph.D. Thesis 1993.
133. Гиневский А.С., Колесников А.В., Подольный И.Н. Метод расчета пристенных турбулентных струй при наличии продольного градиента давления // Ученые записки ЦАГИ, Т. 1, № 4, 1970. С. 34-45.
134. Гиневский А.С., Солодкин Е.Е. Влияние поперечной кривизны поверхности на характеристики осесимметричного турбулентного слоя // ПММ, Т. 22, № 6, 1958.
135. Гиневский А.С., Колесников А.В., Почкина К.А. Экспериментальное исследование осесимметричного пограничного слоя на продольно обтекаемом цилиндре // Ученые записки ЦАГИ, Т. 11, № 4, 1971. С. 52-61.
136. Сыч В.М. Расчет искривленной пристеночной турбулентной струи // Ученые записки ЦАГИ, Vol. 16, No. 3, 1985. pp. 58-68.
137. Сычев В.В. Об отсосе пограничного слоя, предотвращающем его отрыв // Ученые записки ЦАГИ, Т. 5, № 4, 1974. С. 86-89.
138. Петров А.В., Шеломовская В.В. Метод расчета коэффициента импульса струи, потребного для ликвидации отрыва потока на профиле крыла // Труды ЦАГИ, № 1977, 1979.
139. Соколова И.Н. Экспериментальное исследование пределов реализации течения Коанда // Ученые записки ЦАГИ, Т. 14, № 4, 1983. С. 124-126.
140. Соколова И.Н. Использование эффекта Коанда для уменьшения

воздействия струи на преграду // Ученые записки ЦАГИ, Т. 16, № 3, 1985. С. 118-121.

141. Соколова И.Н. Исследование сверхзвукового течения Коанда // Ученые записки ЦАГИ, Т. 16, № 2, 1985. С. 108-111.

142. Соколова И.Н. Горячие струи Коанда // Ученые записки ЦАГИ, Т. 21, № 4, 1990. С. 100-103.

143. Ганич Г.А., Гущина Н.И., Жулев Ю.Г. Эффект Коанда при выдуве струй из прямоугольных сопел под углом к плоской поверхности // Ученые записки ЦАГИ, Т. 25, № 3-4, 1994. С. 121-125.

144. Жулев Ю.Г., Макаров В.А., Наливайко А.Г. Интенсификация эффекта Коанда с помощью создаваемых в струе продольных вихрей // Ученые записки ЦАГИ, Т. 28, № 1, 1997. С. 139-143.

145. Жулев Ю.Г., Макаров В.А., Наливайко А.Г. Способ отклонения осесимметричной струи, распространяющейся вдоль верхней поверхности крыла с закрылком // Ученые записки ЦАГИ, Т. 23, № 1, 1992.

146. Жулев Ю.Г., Макаров В.А., Наливайко А.Г. Интенсификация эффекта Коанда с помощью вводимых в струю продольных вихрей // Ученые записки ЦАГИ, Т. 27, № 1-2, 1996. С. 100-104.

147. Акатнов Н.И. Распространение плоской ламинарной струи истекаемой жидкости вдоль твердой стенки // Труды ЛПИ, техническая гидромеханика, № 5, 1953.

148. Акатнов Н.И., Сюй Мян-Фын. Плоская полуограниченная струя по криволинейной поверхности // ПМТФ, № 6, 1962.

149. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Москва: Издательство "Наука", 1969.

150. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. Москва: Издательство "Энергия", 1968.

151. Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости. Москва: Издательство "Наука", 1965.

152. Идельчик И.Е. Аэродинамика промышленных аппаратов. Москва:

Машиностроение, 1983. 520 с.

153. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва: Наука, 1973. 848 с.

154. Batchelor G. Homogeneous Turbulence. Cambridge. 1955.

155. Wallis G. One-dimensional two-phase flow. New York: McGraw-Hill, 1969.

156. Yan F., Wang Z.Q., Bai C.H., Zhang Q.M. Numerical research on vortex and wave interaction of modulation jet stream // Beijing Ligong Daxue Xuebao, Vol. 1, No. 29, 2009. pp. 90-93.

157. Кельмансон И.А. Исследование турбулентной структуры в свободных турбулентных струях, Алма-Ата, 1968. 17 с.

158. Вулис Л.А., Кельмансон И.А., Палатник И.Б. Исследование структуры течения в плоской турбулентной струе // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, № 4, 1970. С. 176-179.

159. Оспанов М., Балабеков С., Горбунов А., Голубев Г., Добина М., Бакбергенов А. Центробежный пылеуловитель, а.с. SU 1526764 А, Dec 7, 1989.

160. Квашнин И.М., Юнкеров Ю.И. Струйно-инерционный пылеуловитель, патент RU 2102115, Jan 20, 1998.

161. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. Москва: Экопресс, 1998. 505 с.

162. Барский, М. Д. Фракционирование порошков / М. Д. Барский. - М. : Недра, 1980.

163. Ефремов, Г. И. Пылеочистка / Г. И. Ефремов. - М. : Химия, 1990.

164. Квашнин, И. М. Очистка воздуха от пыли: учеб. пособие / И. М. Квашнин, Ю. И. Юнкеров; ПГАСА. - Пенза, 1995.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Список основных условных обозначений

t - время;

m - масса частицы;

$d_{\text{э}}$ - эквивалентный диаметр частицы;

$\rho_{\text{ч}}$ - плотность частицы;

ρ - плотность воздуха;

\vec{P} - сила тяжести определяется вектором;

\vec{g} - вектор ускорения силы тяжести, в расчетах принято $g = 9.81 \text{ м}^2/\text{с}$;

\vec{A} - аэродинамическая сила;

$F_{\text{м}}$ - площадь миделева сечения частицы;

ψ_0 - коэффициент лобового сопротивления в области автомодельности;

Re - число Рейнольдса;

μ - коэффициент динамической вязкости воздуха ($\text{Па} \cdot \text{с}$);

x, y, φ - цилиндрические оси координат;

\vec{u} - вектор скорости несущей среды (воздуха);

u_y, u_{φ} и u_x - соответствующие проекции вектора скорости воздуха;

\vec{v} - вектор скорости частиц;

\vec{v}_0 - вектор скорости частицы в начальный момент времени;

v_x - проекции вектора скорости частицы, соответственно и на вертикальную ось Ox (скорость вертикального перемещения частицы);

v_y - проекции вектора скорости частицы, соответственно на ось Oy (радиальная составляющая скорости);

v_{φ} - проекции вектора скорости частицы, соответственно на перпендикуляр к оси

Oy (окружная скорость);

ω_{φ} - угловая составляющая скорости частицы;

l_∞ – характерная длина;

u_∞ – скорость;

τ_∞ – время;

$x_1; x_2; x_3; x_4; x_5; x_6; \tau$ – безразмерные величины;

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

Fr – число Фруда, учитывающее действие сил тяжести;

St – число Стокса, учитывающее действие аэродинамических сил;

$\frac{u_x}{u_\infty}, \frac{u_y}{u_\infty}, \frac{u_\varphi}{u_\infty}$ – безразмерные составляющие струйного течения, которые должны

быть заданы функциями безразмерных координат x_1, x_2, x_3 ;

u_0 – средняя по расходу скорость воздуха в выпускном отверстии;

b_0 – высота щели;

d_0 – диаметр круглого патрубка;

D – диаметр бункера;

H – высота бункера;

ν_T – коэффициент турбулентного обмена;

$\eta = Bux^\beta$ – независимая переменная аффинных преобразований;

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

u_{xm} и $u_{\varphi m}$ – продольная и окружная составляющая скорости на оси струи;

P_m – избыточное давление на оси струи, Па;

$\alpha, \beta, \epsilon, \delta, A, B, C, D$ – константы автомодельности;

$\eta_{1/2}$ – некоторое «половинное» значение соответствующее значению $u_x/u_{xm} = 0.5$;

$x_{1/2}; y_{1/2}$ – значение координат точек, в которых $u_x/u_{xm} = 0.5$;

I_x – начальный импульс;

u_{x0} – скорость воздуха на выходе из патрубка;

$\bar{x} = x/d_0; \bar{y} = y/d_0$ – безразмерные координаты;

a – экспериментальный коэффициент «турбулентной структуры» струи;

M_x – поток момента количества движения относительно оси ОХ;

M_y – поток момента количества движения относительно оси ОУ;

Q – расход;

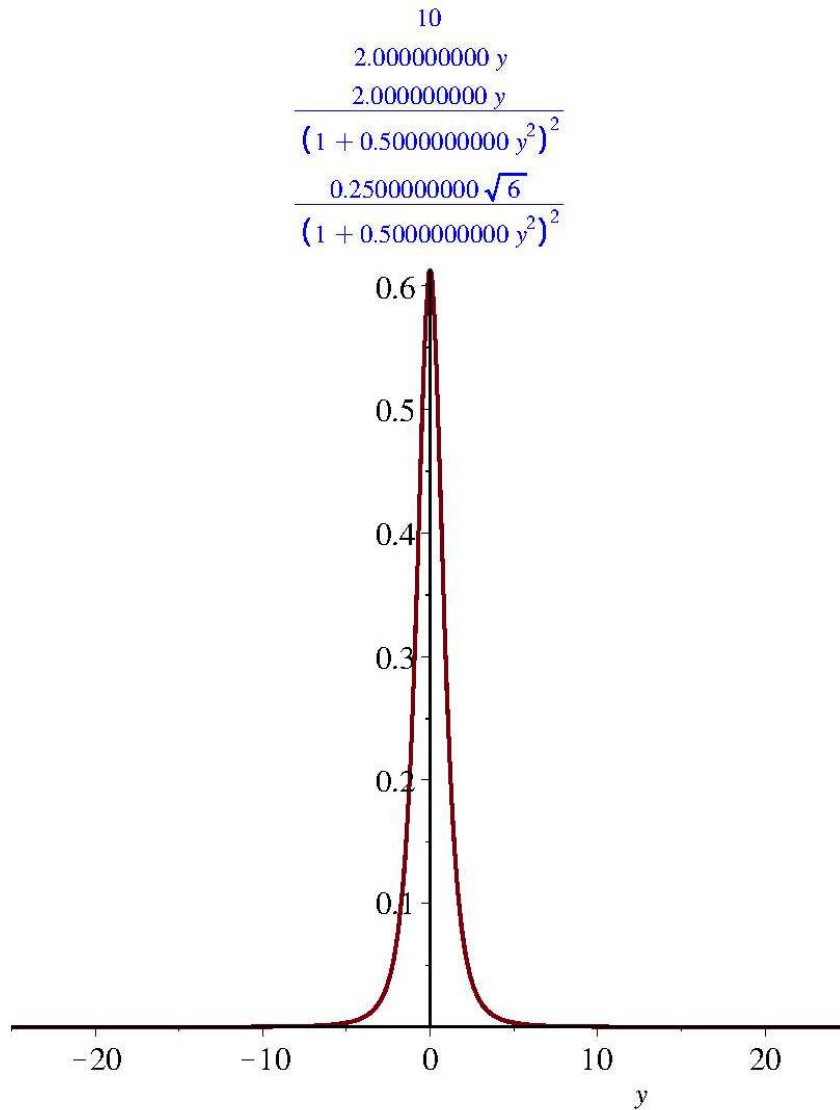
\bar{a} – функция, определяющая изменение безразмерных скоростей.

Приложение Б. Программа расчета проекций скорости осесимметричной струи

```

restart;
a := 0.05 :
Kx :=  $\frac{1}{a} \cdot \sqrt{\frac{3}{32}}$  : Ky :=  $\frac{2 \cdot a}{3} \sqrt{\frac{3}{32}}$  : Kφ :=  $\frac{1}{24 \cdot a^2} \sqrt{\frac{3}{32}}$  ;
for i from 10 by 34 to 350 do x := i; η :=  $\frac{y}{a \cdot x}$  : F2 :=  $\frac{\eta}{(1 + 0.125 \cdot \eta^2)^2}$  : ux :=  $\frac{Kx \cdot F2}{x \cdot \eta}$  : plot(ux,
y = -25 .. 25); od;

```

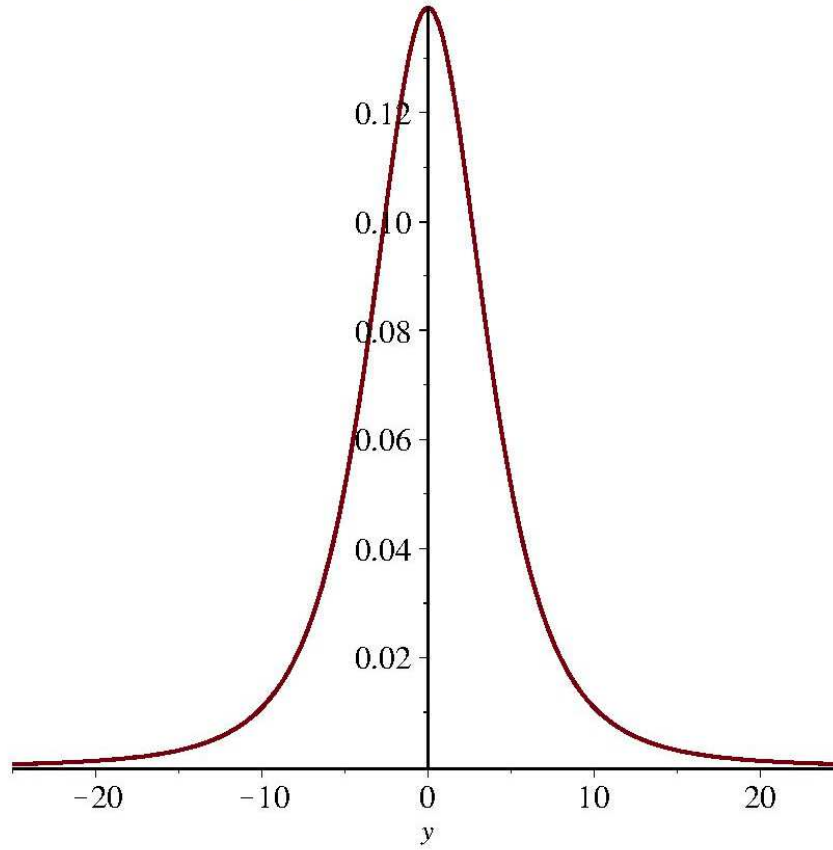


44

0.4545454545 y

$$\frac{0.4545454545 y}{(1 + 0.02582644628 y^2)^2}$$

$$\frac{0.05681818180 \sqrt{6}}{(1 + 0.02582644628 y^2)^2}$$

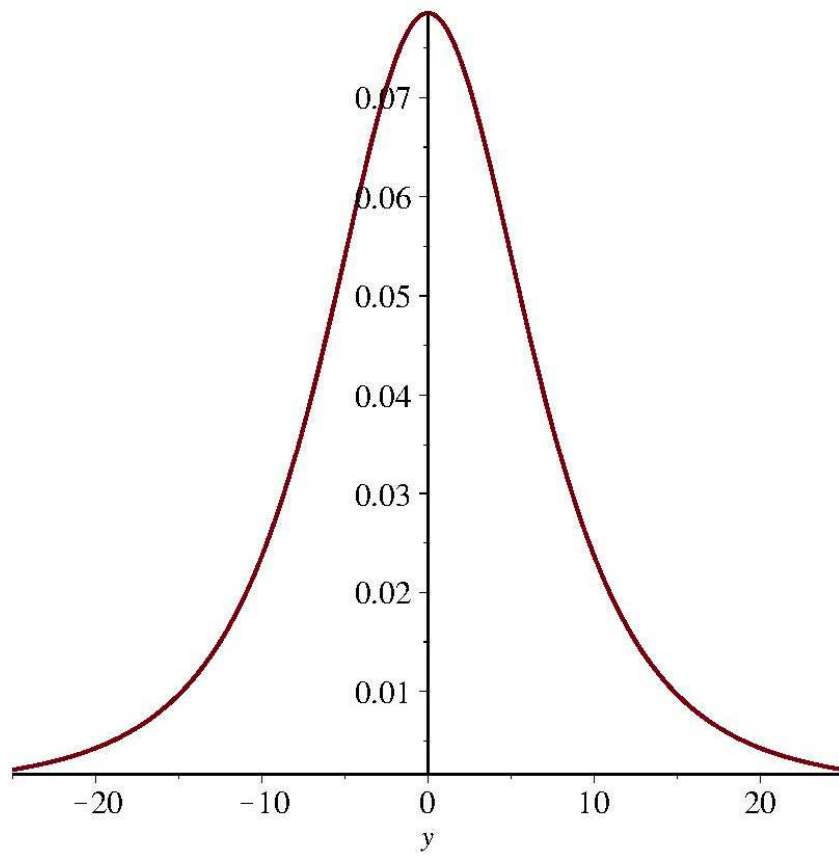


78

$$\frac{0.2564102564 y}{(1 + 0.008218277449 y^2)^2}$$

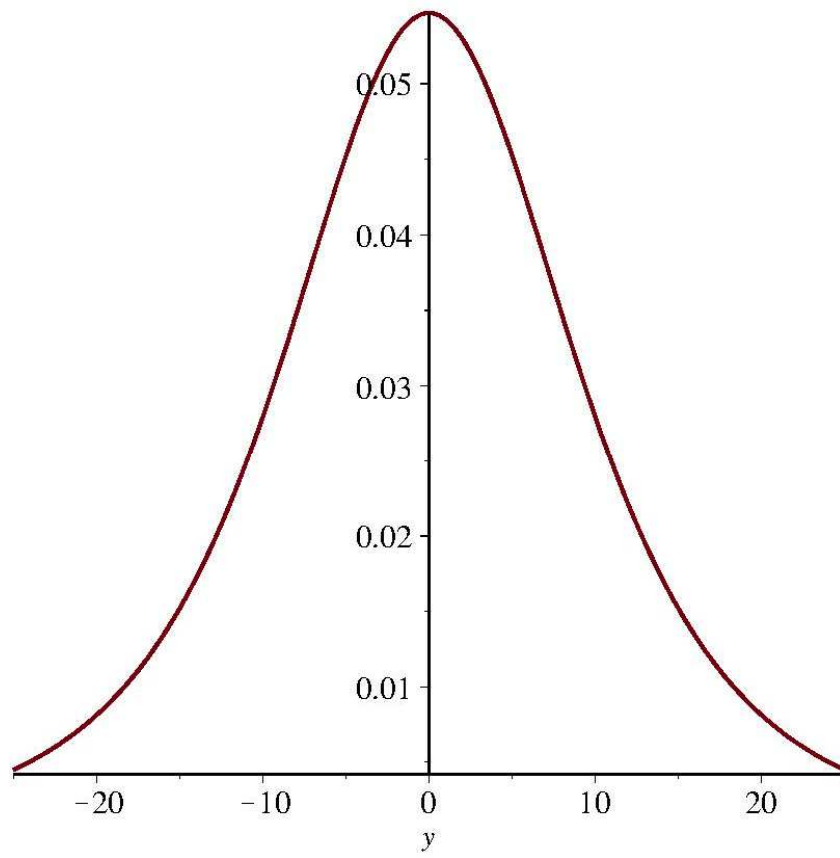
$$\frac{0.2564102564 y}{(1 + 0.008218277449 y^2)^2}$$

$$\frac{0.03205128205 \sqrt{6}}{(1 + 0.008218277449 y^2)^2}$$



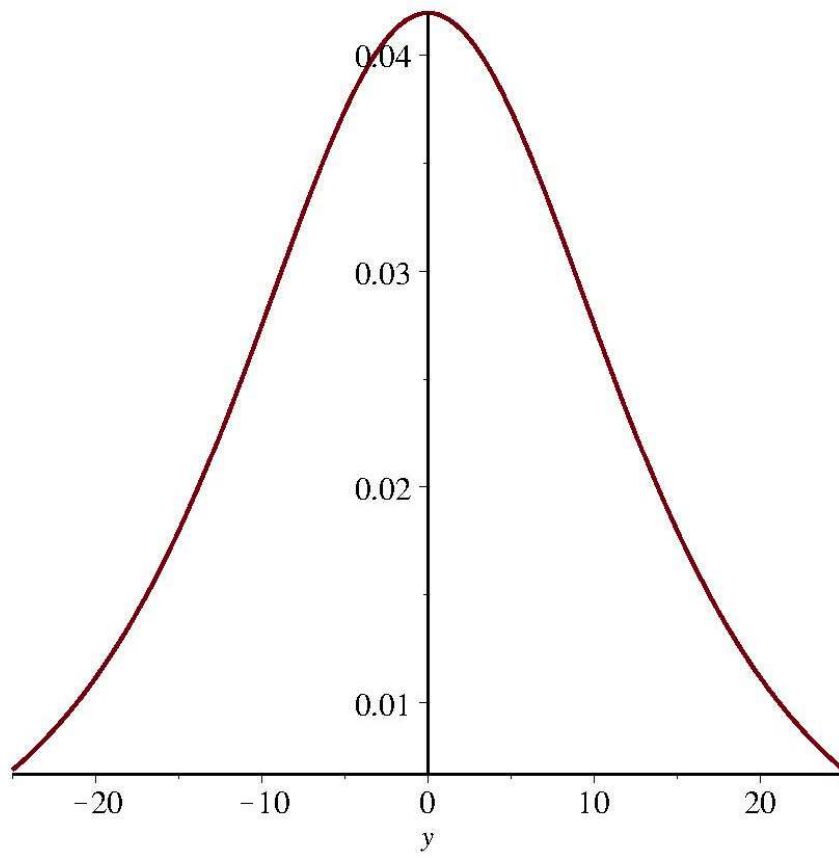
112

$$\frac{0.1785714286 y}{0.1785714286 y} \frac{(1 + 0.003985969389 y^2)^2}{0.02232142857 \sqrt{6}} \frac{(1 + 0.003985969389 y^2)^2}{(1 + 0.003985969389 y^2)^2}$$



146

$$\frac{0.1369863014 y}{0.1369863014 y} \frac{0.01712328767 \sqrt{6}}{(1 + 0.002345655846 y^2)^2}$$

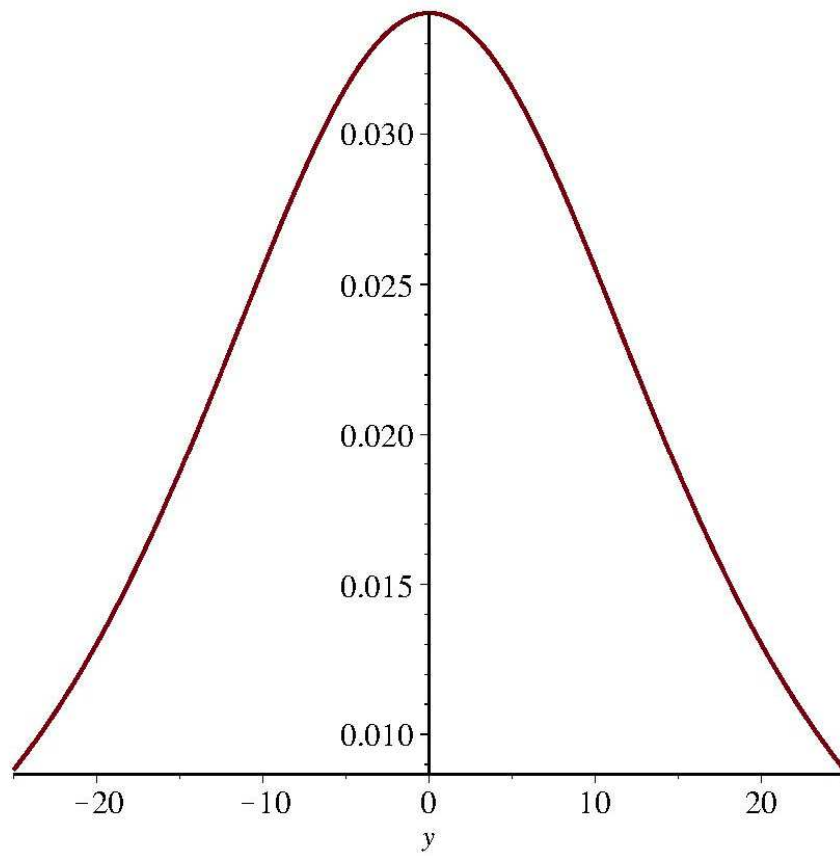


180

$$\frac{0.1111111111 y}{0.1111111111 y}$$

$$\frac{(1 + 0.001543209876 y^2)^2}{0.0138888889 \sqrt{6}}$$

$$\frac{(1 + 0.001543209876 y^2)^2}{(1 + 0.001543209876 y^2)^2}$$



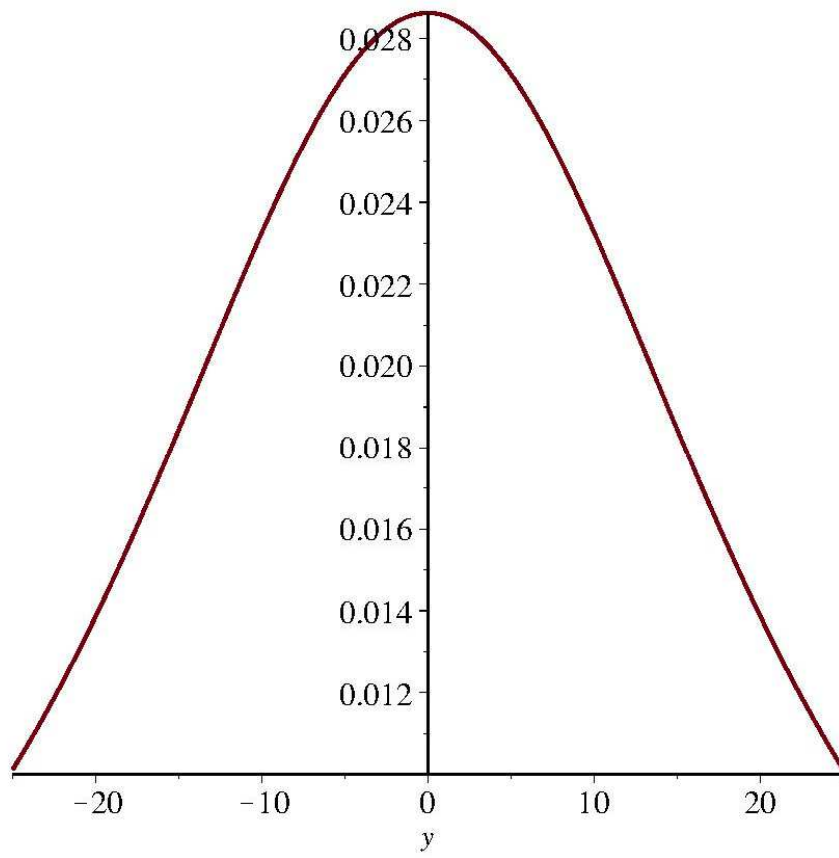
214

$$0.09345794393 y$$

$$\frac{0.09345794393 y}{(1 + 0.001091798410 y^2)^2}$$

$$\frac{0.01168224299 \sqrt{6}}{(1 + 0.001091798410 y^2)^2}$$

$$\frac{0.01168224299 \sqrt{6}}{(1 + 0.001091798410 y^2)^2}$$



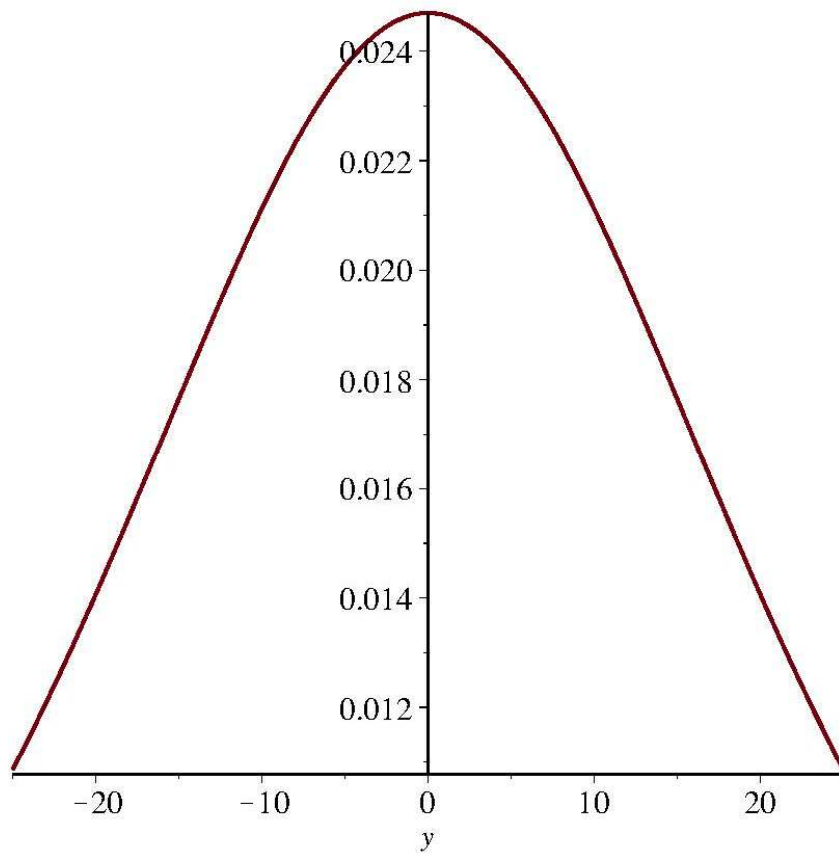
248

$$0.08064516129 y$$

$$\frac{0.08064516129 y}{(1 + 0.0008129552549 y^2)^2}$$

$$\frac{0.01008064516 \sqrt{6}}{(1 + 0.0008129552549 y^2)^2}$$

$$\frac{0.01008064516 \sqrt{6}}{(1 + 0.0008129552549 y^2)^2}$$



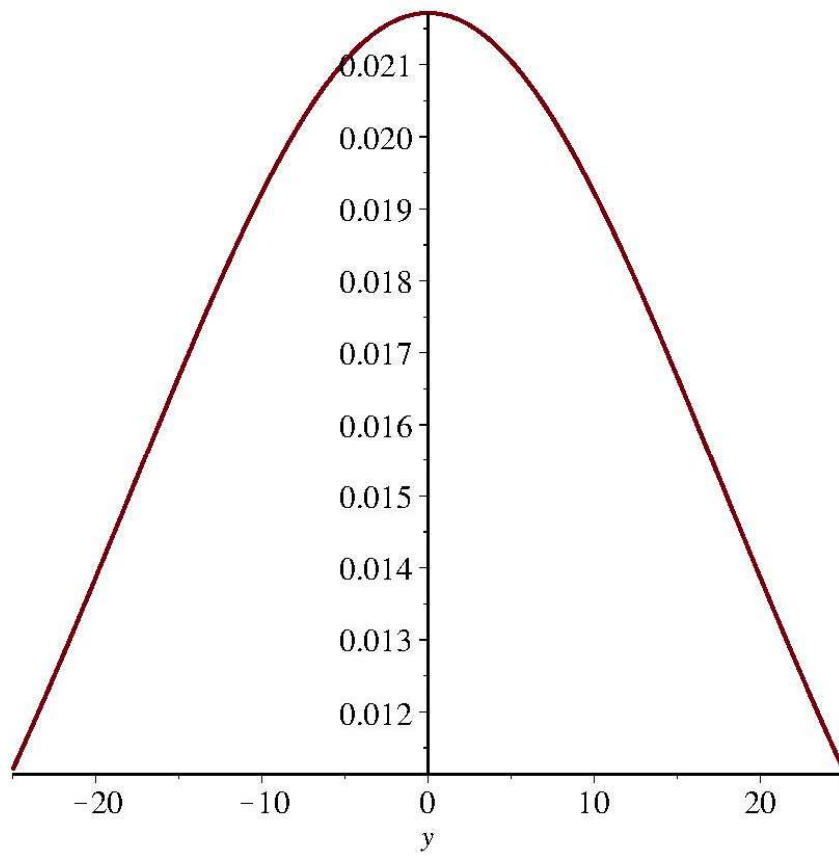
282

$$0.07092198582 y$$

$$\frac{0.07092198582 y}{(1 + 0.0006287410091 y^2)^2}$$

$$\frac{0.008865248229 \sqrt{6}}{(1 + 0.0006287410091 y^2)^2}$$

$$\frac{0.008865248229 \sqrt{6}}{(1 + 0.0006287410091 y^2)^2}$$



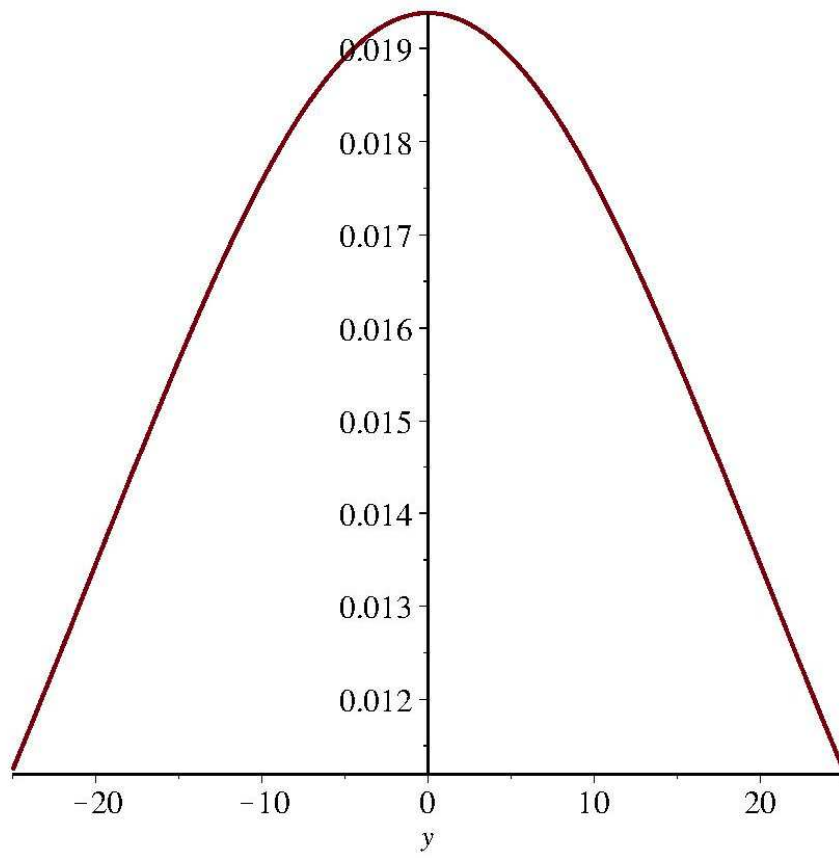
316

$$0.06329113924 y$$

$$\frac{0.06329113924 y}{(1 + 0.0005007210382 y^2)^2}$$

$$\frac{0.007911392405 \sqrt{6}}{(1 + 0.0005007210382 y^2)^2}$$

$$\frac{0.007911392405 \sqrt{6}}{(1 + 0.0005007210382 y^2)^2}$$



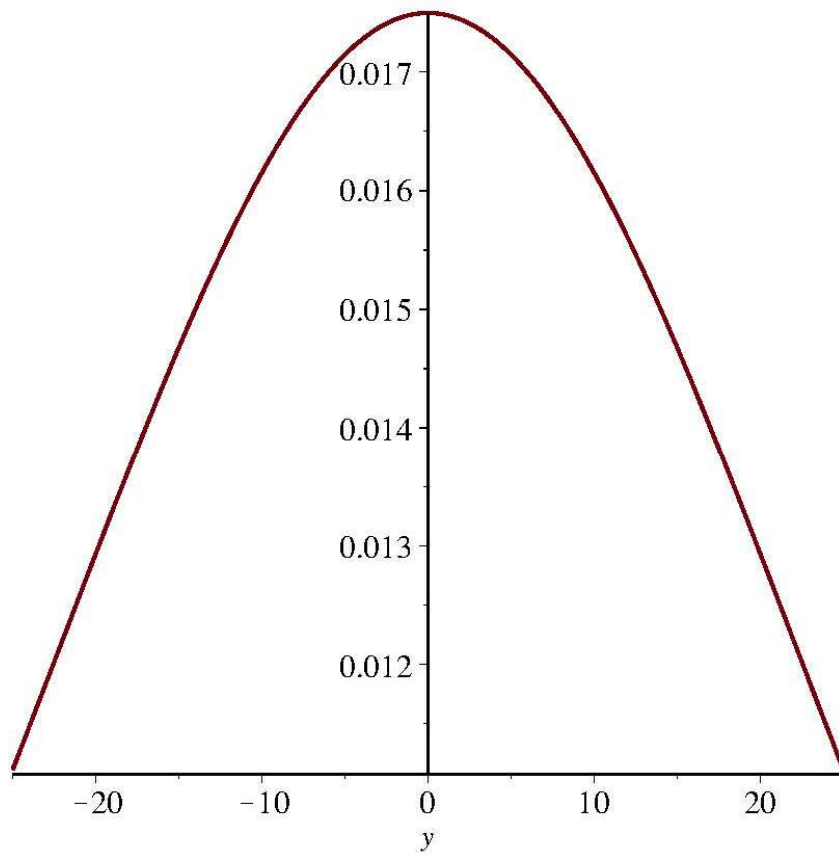
350

$$0.05714285714 y$$

$$\frac{0.05714285714 y}{(1 + 0.0004081632652 y^2)^2}$$

$$\frac{0.007142857140 \sqrt{6}}{(1 + 0.0004081632652 y^2)^2}$$

$$\frac{0.007142857140 \sqrt{6}}{(1 + 0.0004081632652 y^2)^2}$$

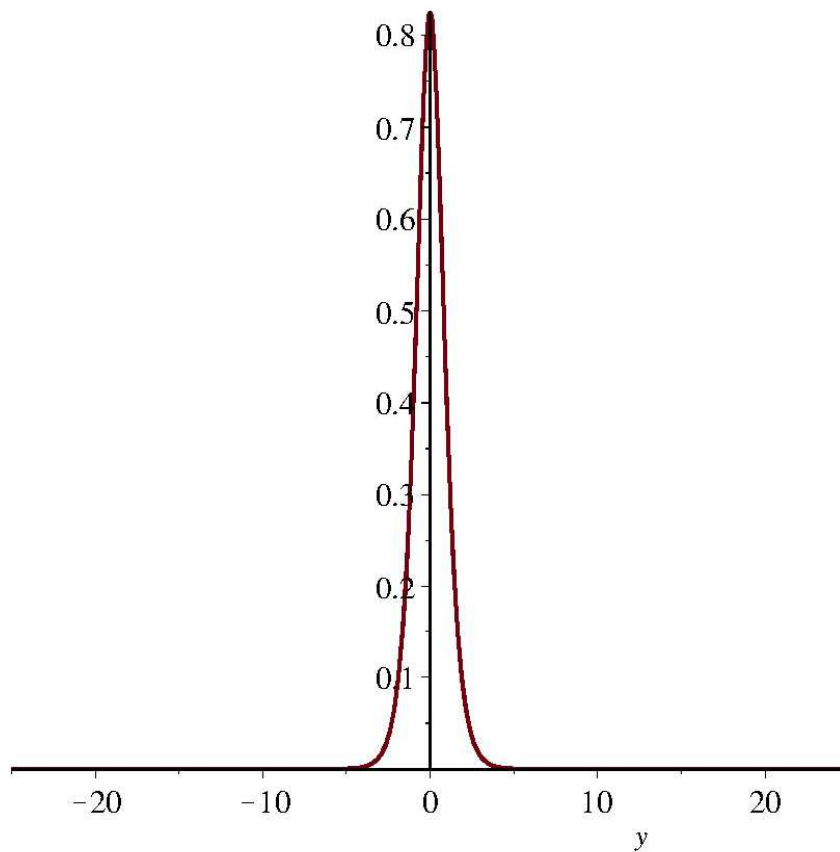


Приложение В. Программа расчета проекций скорости плоской струи

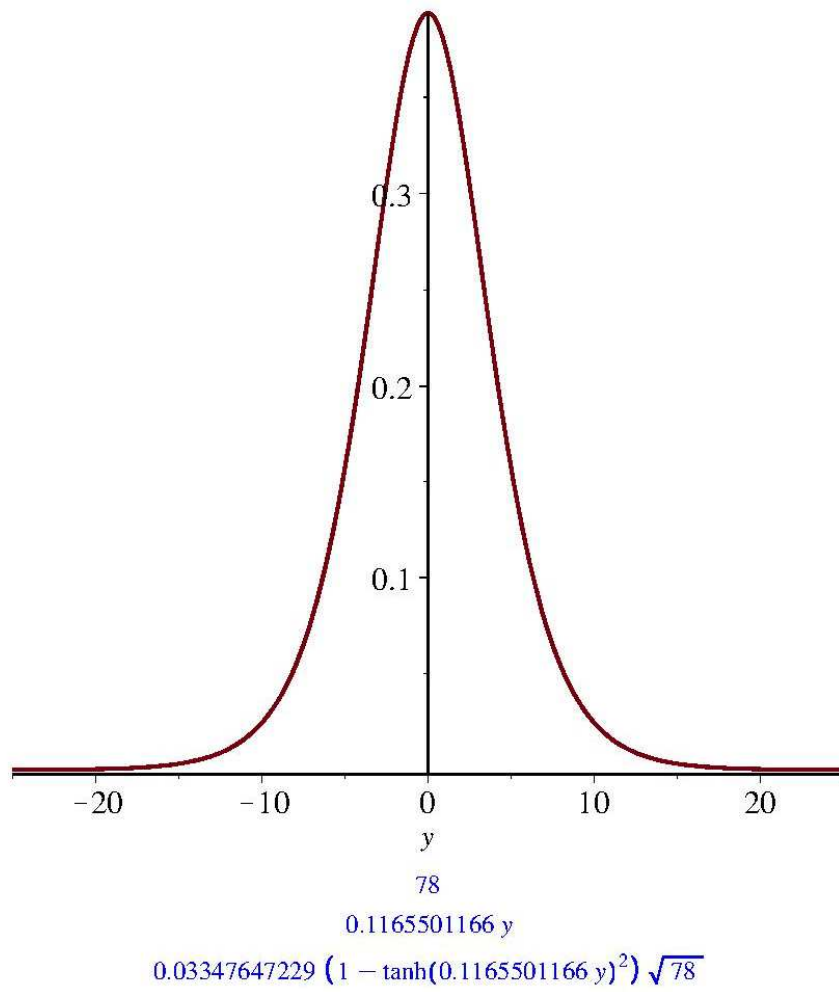
```

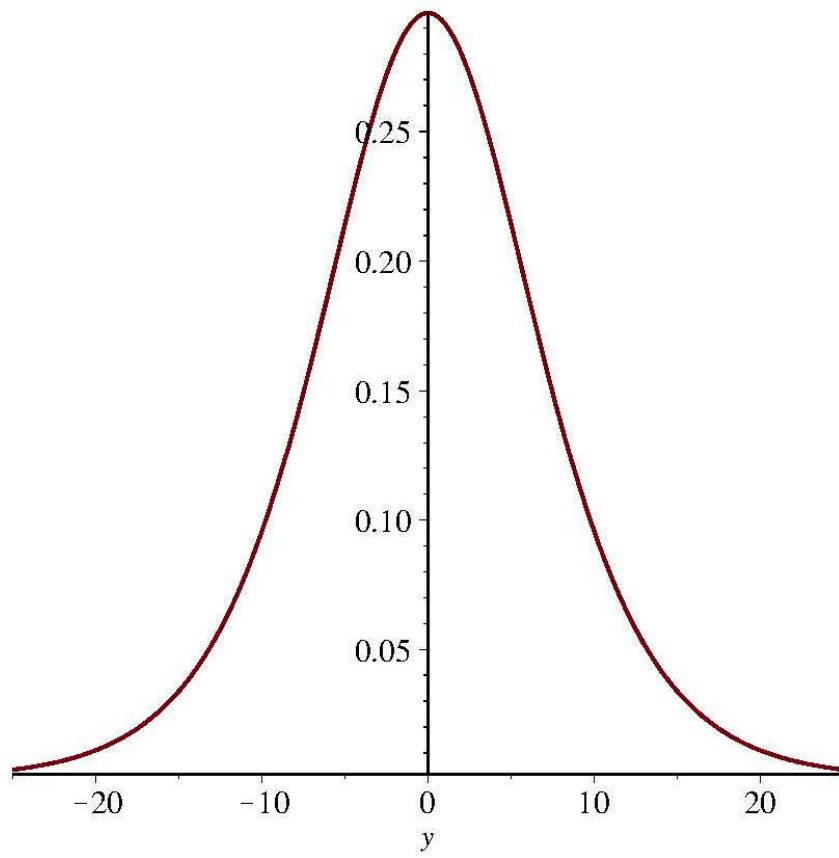
restart;
a := 0.11 :
Kx :=  $\sqrt{\frac{3}{4 \cdot a}}$  : Ky :=  $\sqrt{\frac{3 \cdot a}{4}}$  :
for i from 10 by 34 to 350 do x := i;  $\eta := \frac{y}{a \cdot x}$  :  $ux := Kx \cdot \frac{1 - \tanh^2(\eta)}{\sqrt{x}}$  : plot(ux, y=-25..25); od;

```



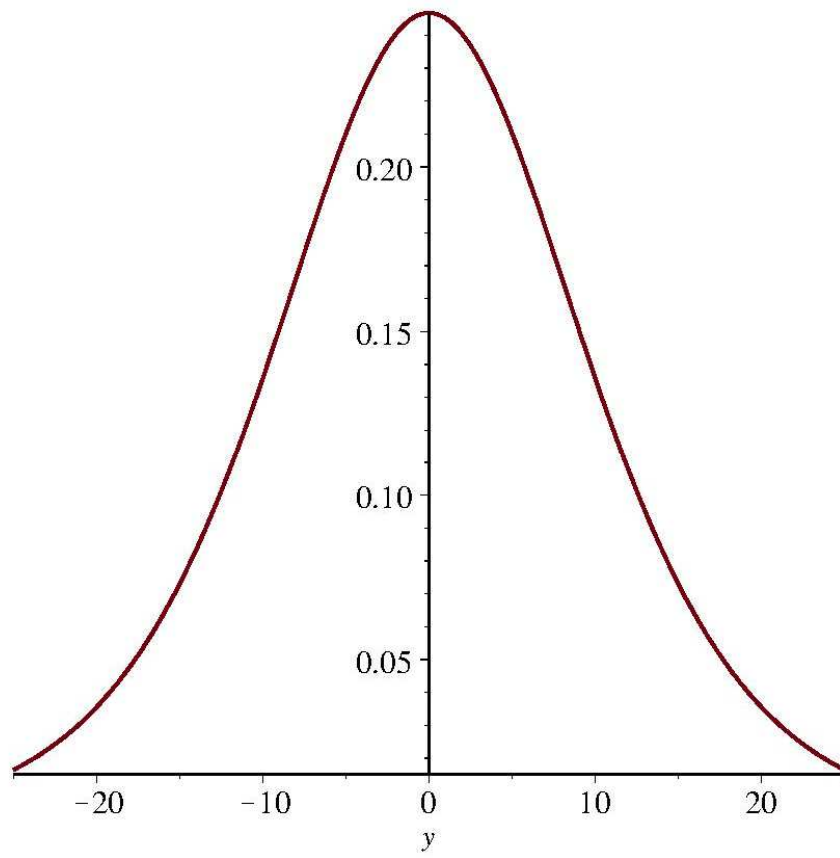
44
0.2066115702 y
0.1186893109 (1 - tanh(0.2066115702 y)²) $\sqrt{11}$





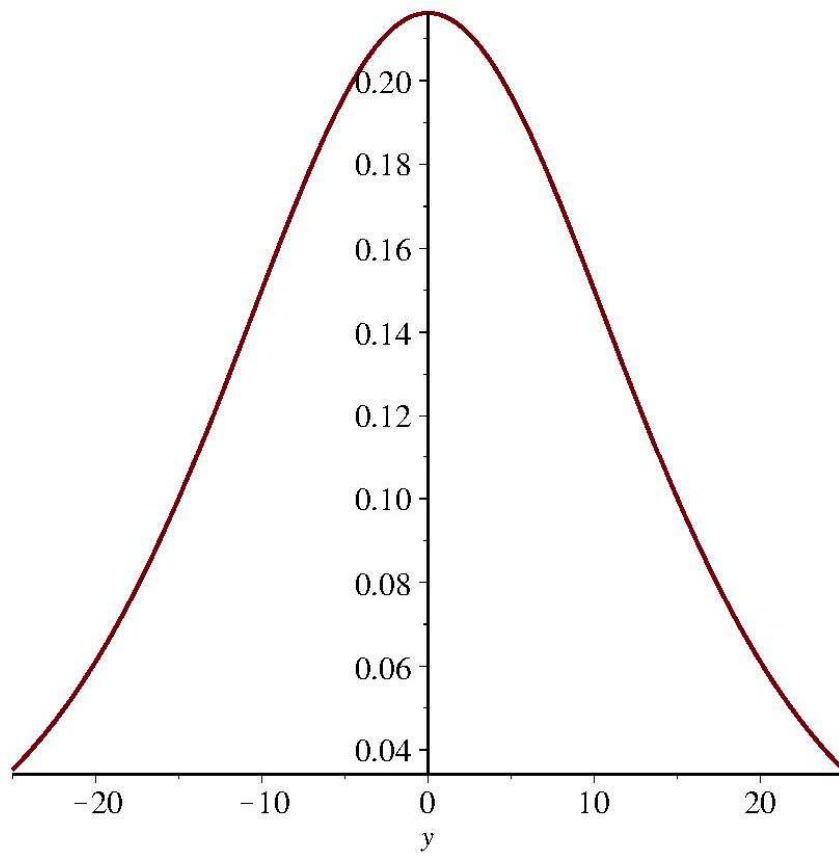
112

 $0.08116883117 y$ $0.09325588711 (1 - \tanh(0.08116883117 y)^2) \sqrt{7}$



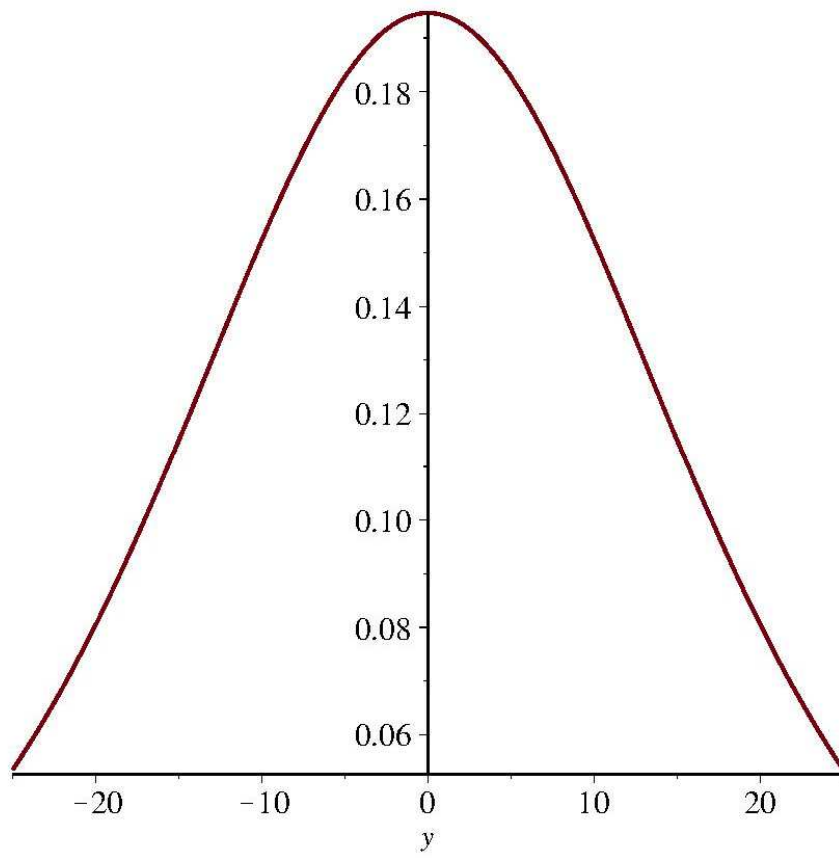
146

 $0.06226650062 y$ $0.01788469068 (1 - \tanh(0.06226650062 y)^2) \sqrt{146}$



180

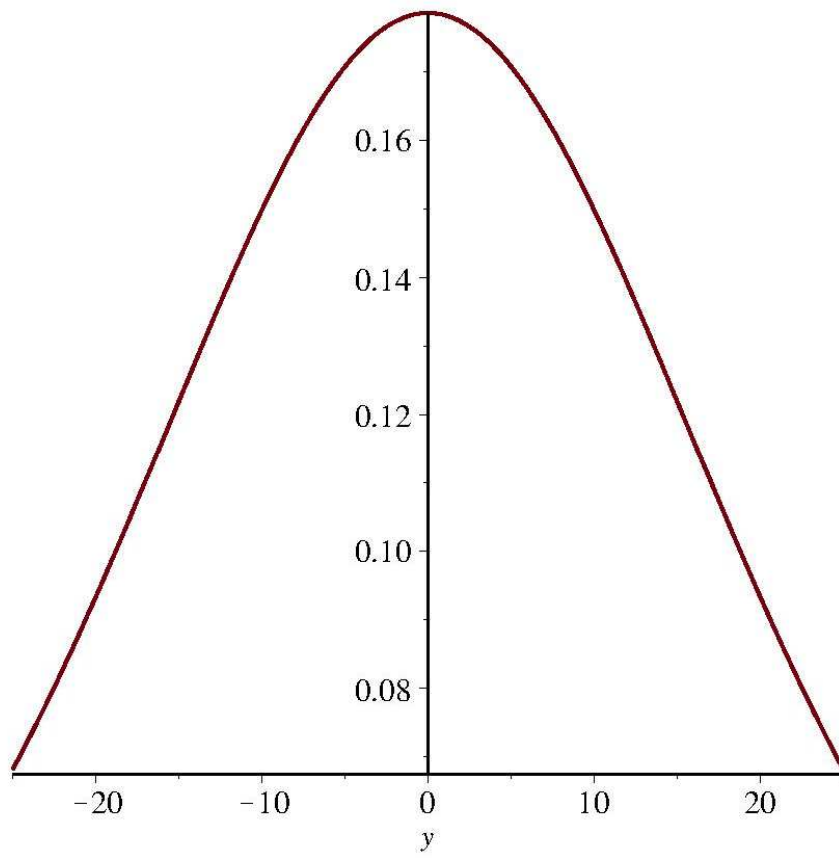
 $0.05050505051 y$ $0.08703882796 (1 - \tanh(0.05050505051 y)^2) \sqrt{5}$



214

0.04248088360 y

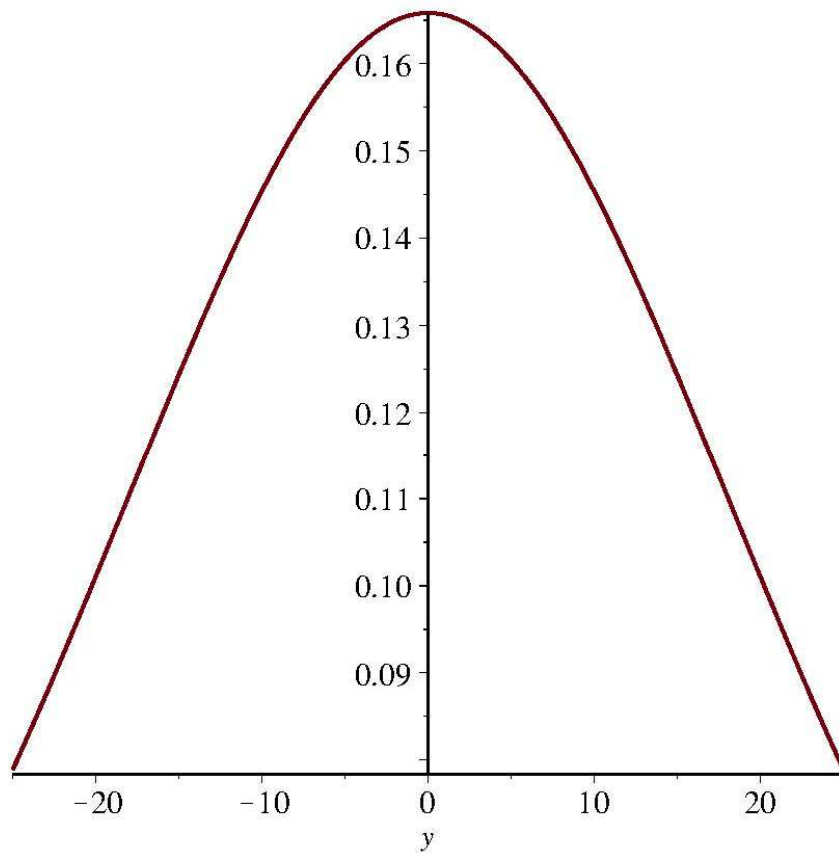
$$0.01220170486 (1 - \tanh(0.04248088360 y)^2) \sqrt{214}$$



248

0.03665689150 y

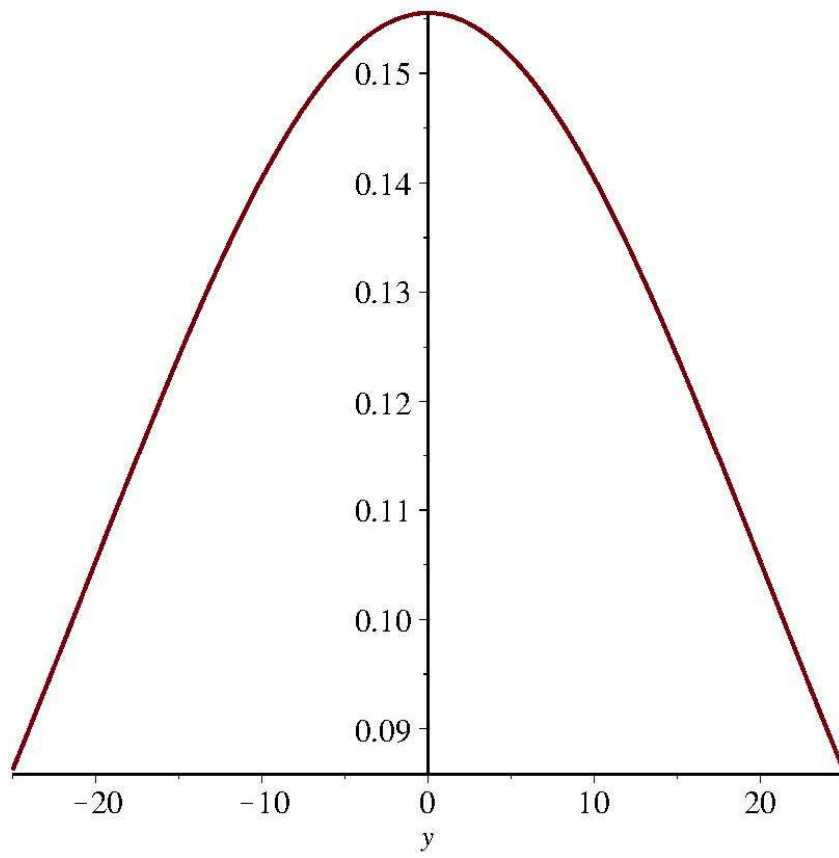
$$0.02105778097 (1 - \tanh(0.03665689150 y)^2) \sqrt{62}$$



282

0.03223726628 y

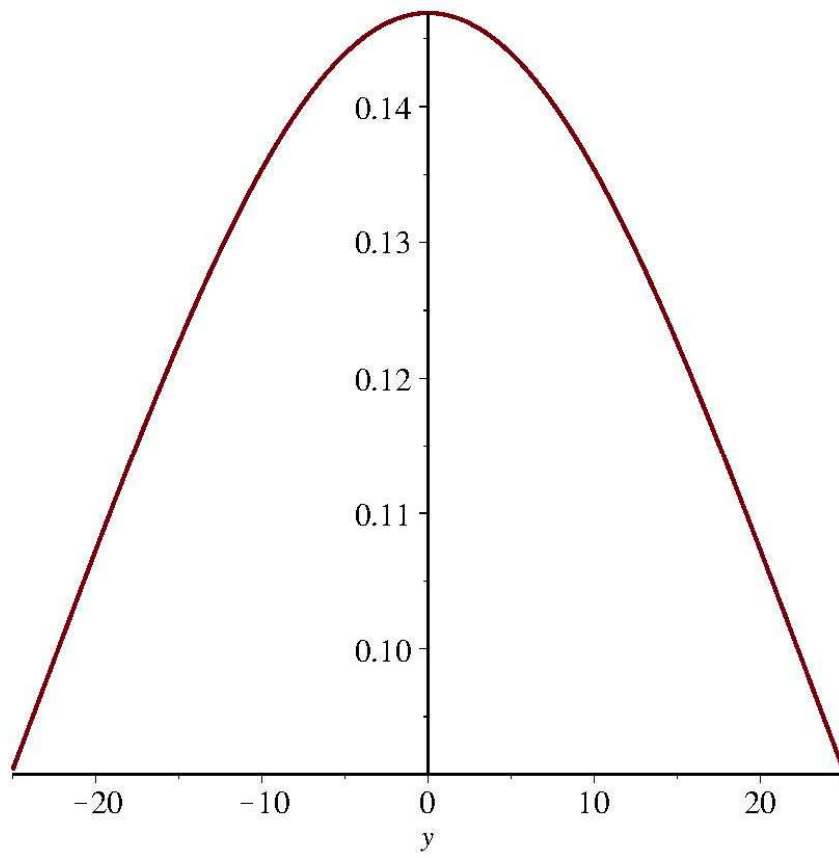
$$0.009259449784 (1 - \tanh(0.03223726628 y)^2) \sqrt{282}$$



316

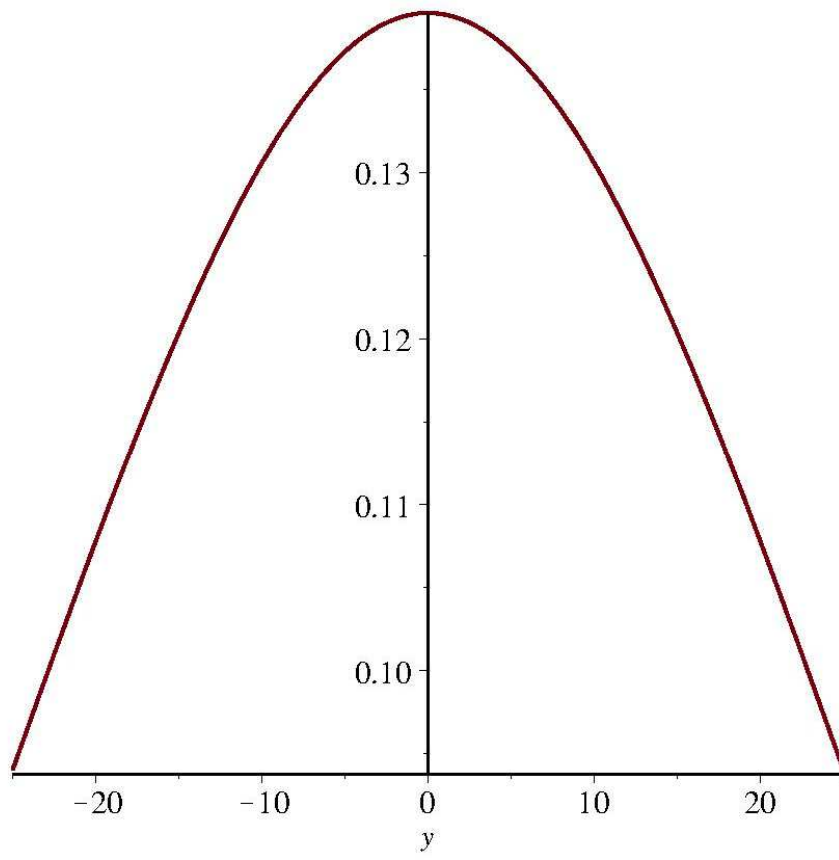
0.02876869966 y

$$0.01652635975 (1 - \tanh(0.02876869966 y)^2) \sqrt{79}$$



350

 $0.02597402597 y$ $0.03730235484 (1 - \tanh(0.02597402597 y)^2) \sqrt{14}$

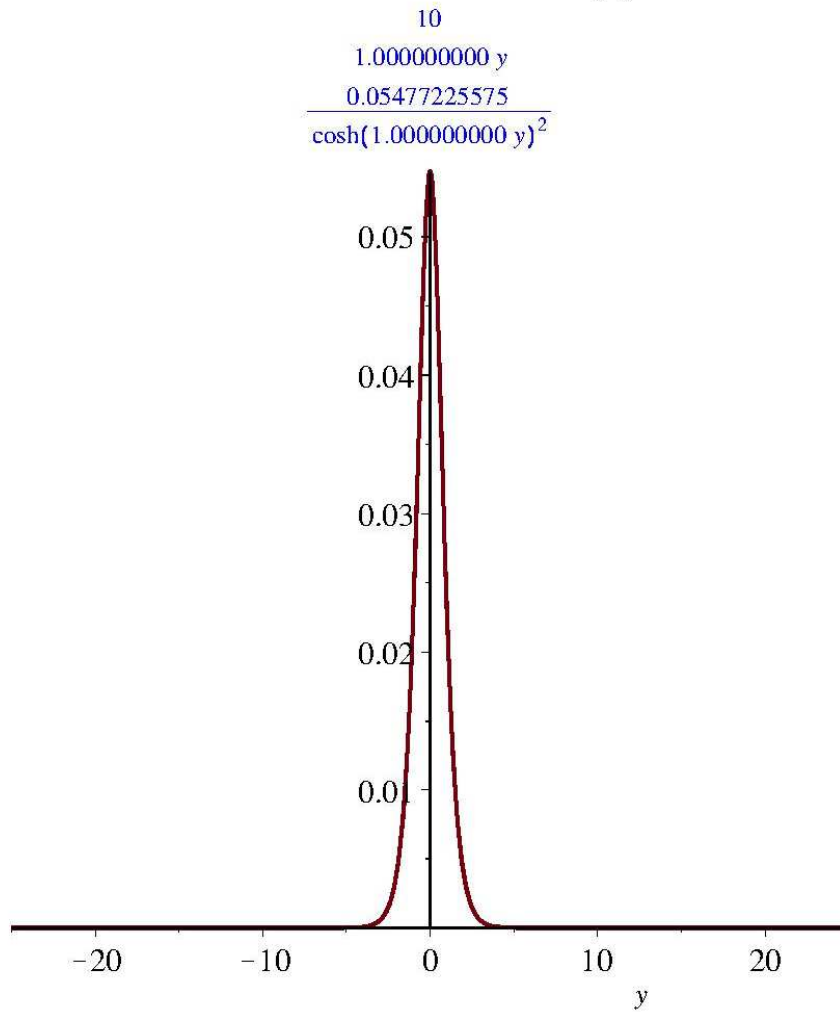


Приложение Г. Программа расчета проекций скорости веерной струи

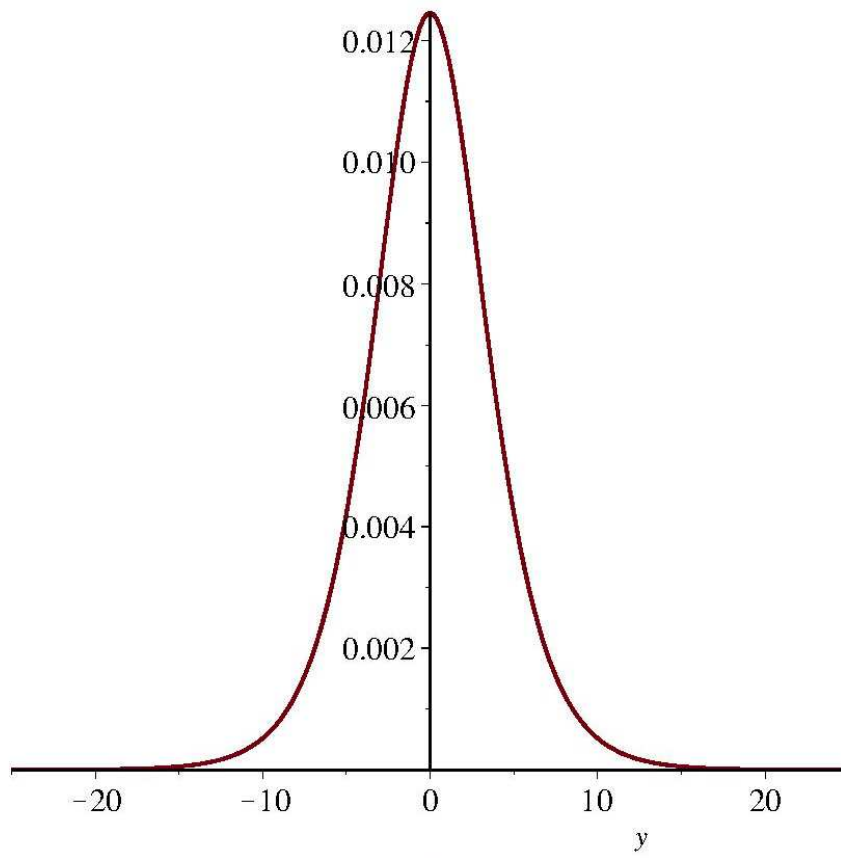
```

restart;
a := 0.1 : r :=  $\frac{0.08}{2}$  :
Kx :=  $\sqrt{\frac{3 \cdot r}{4 \cdot a}}$  : Ky :=  $\sqrt{\frac{3 \cdot a \cdot r}{4}}$  :
for i from 10 by 34 to 350 do x := i;  $\eta := \frac{y}{a \cdot x}$  : ux :=  $\frac{Kx}{x \cdot \cosh^2(\eta)}$  : plot(ux, y = -25 .. 25); od;

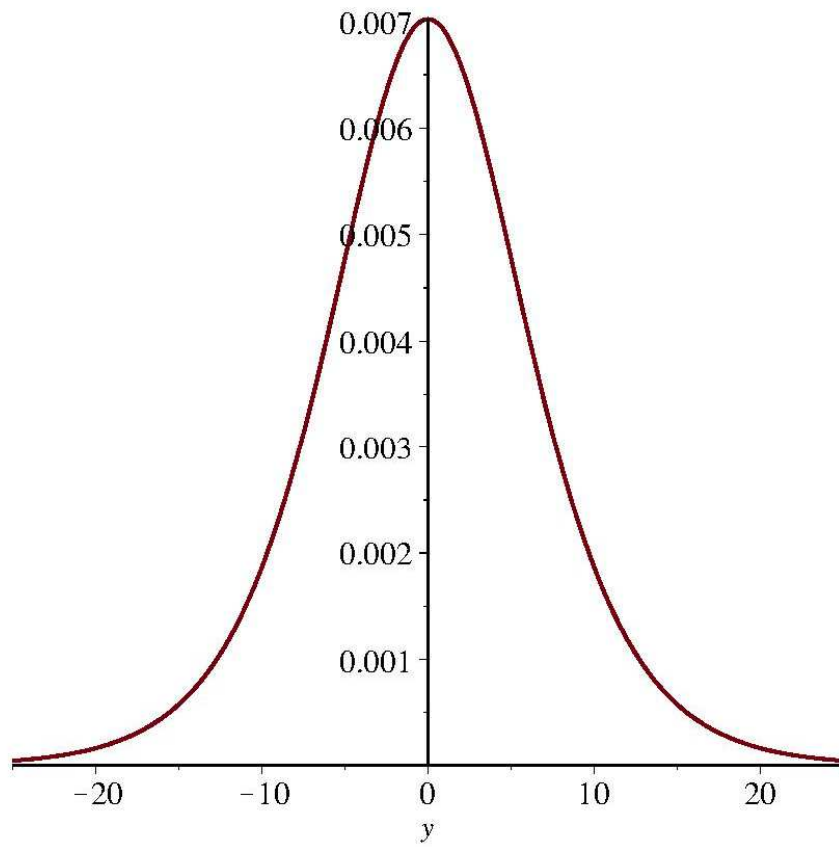
```



$$\frac{44 \cdot 0.2272727273 y \cdot 0.01244823994}{\cosh(0.2272727273 y)^2}$$

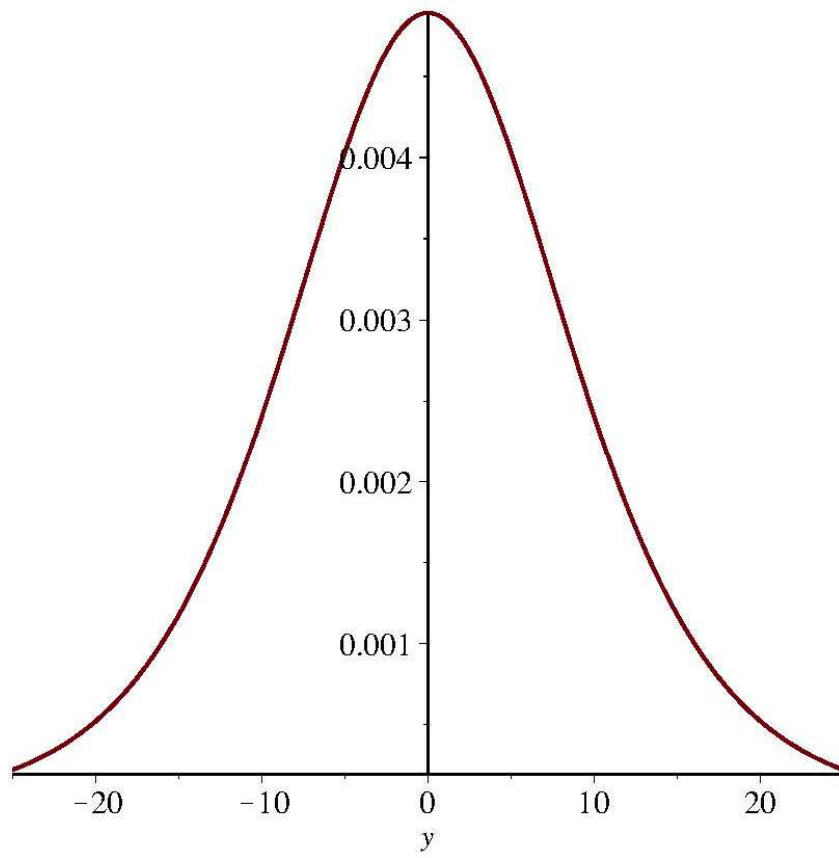


$$\frac{78}{\frac{0.1282051282 y}{0.007022084071} \cosh(0.1282051282 y)^2}$$



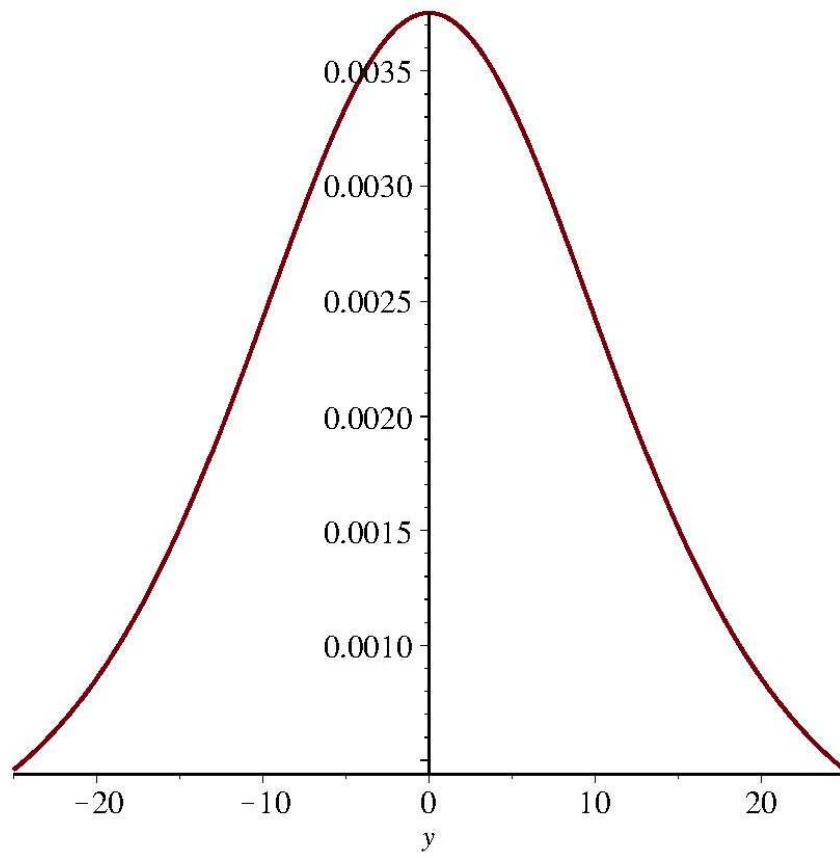
112

 $0.08928571429 y$ 0.004890379978 $\frac{0.004890379978}{\cosh(0.08928571429 y)^2}$



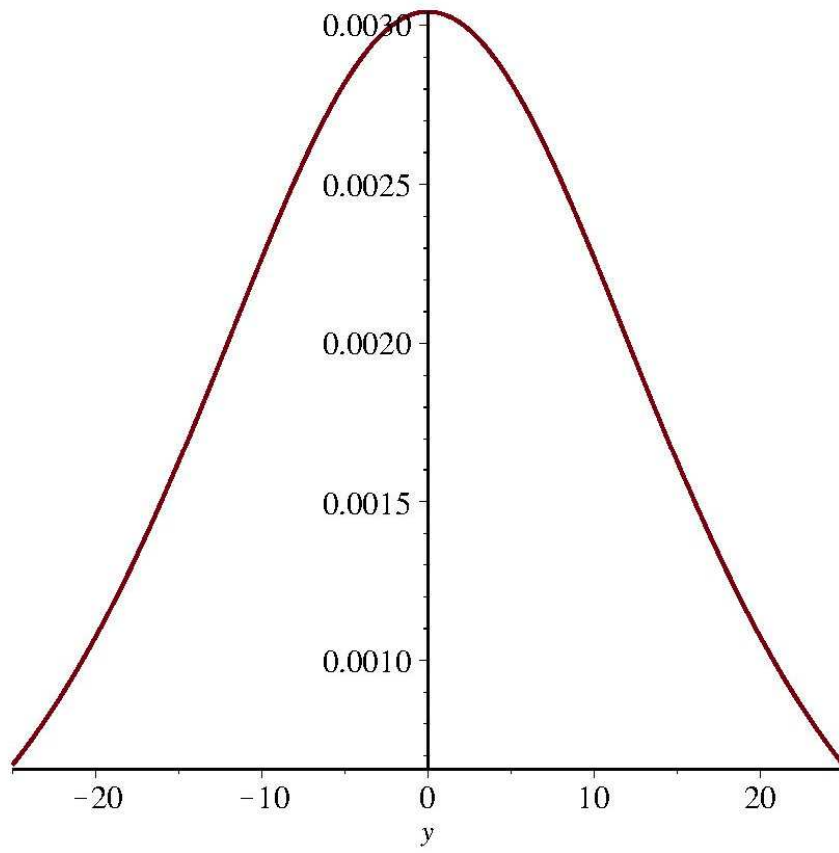
146

 $0.06849315068 y$ 0.003751524366 $\frac{0.003751524366}{\cosh(0.06849315068 y)^2}$



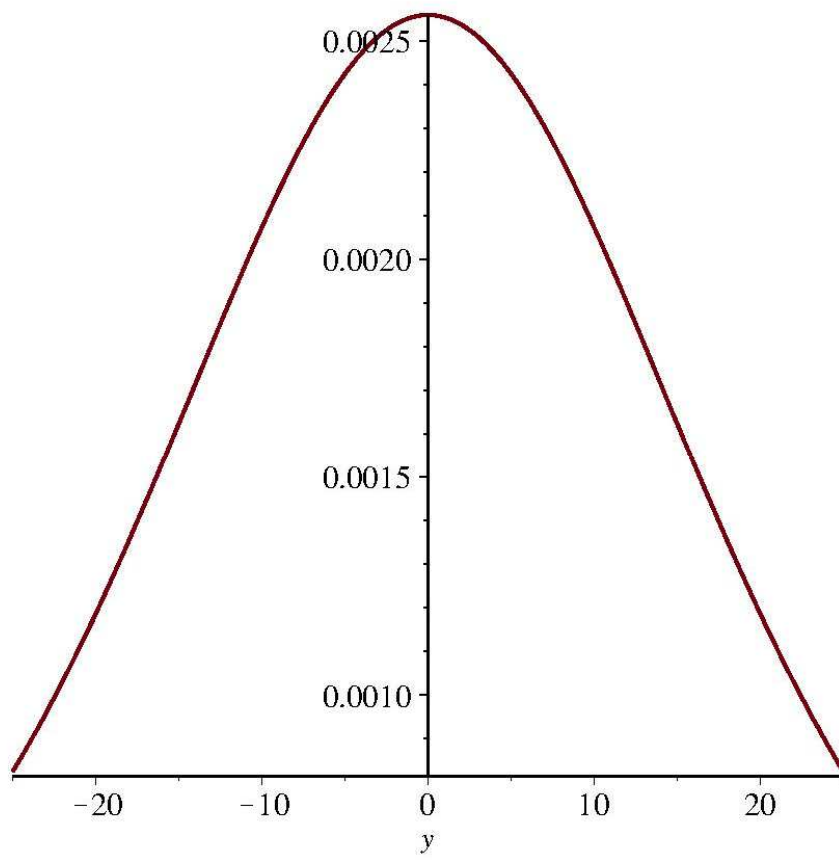
180

 $0.0555555556 y$ 0.003042903097 $\frac{0.003042903097}{\cosh(0.0555555556 y)^2}$

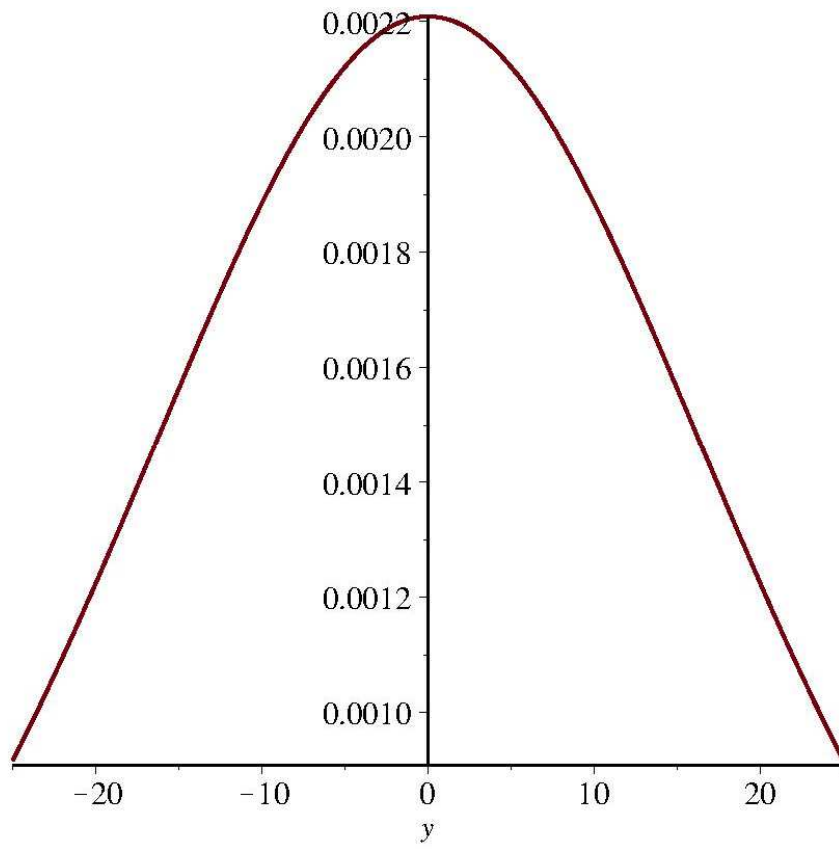


214

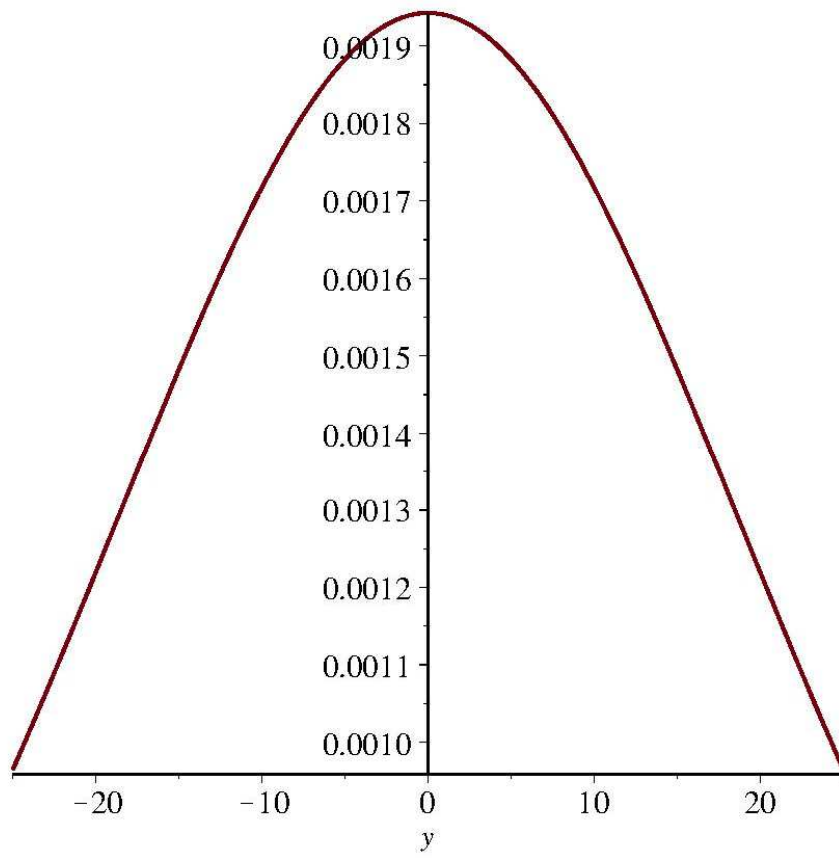
 $0.04672897196 y$ 0.002559451203 $\frac{0.002559451203}{\cosh(0.04672897196 y)^2}$



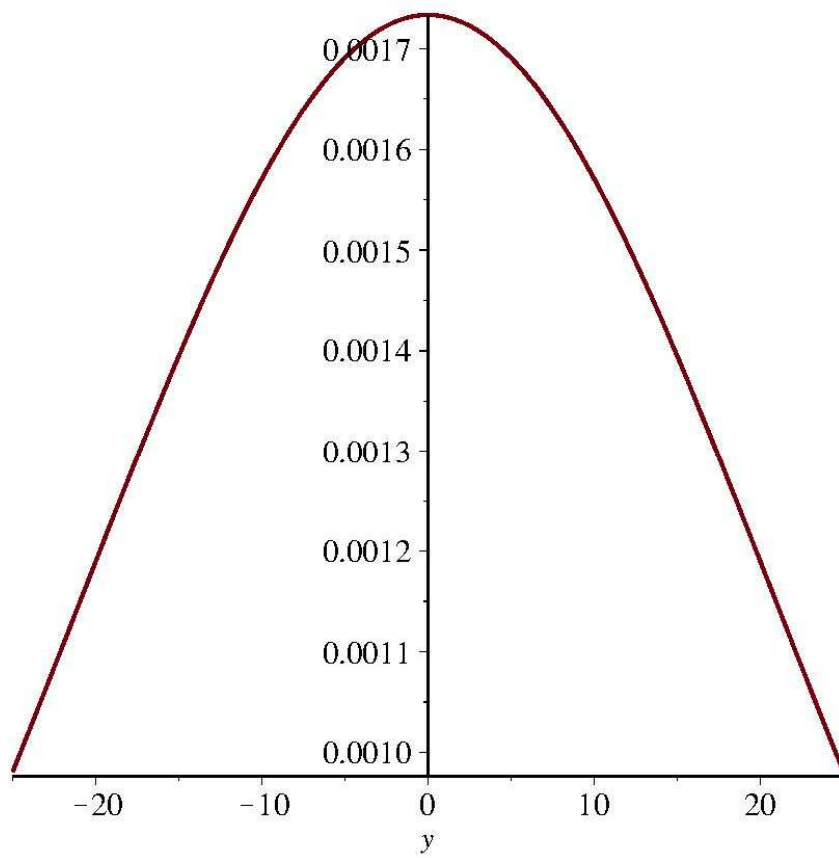
$$\frac{248}{\cosh(0.04032258065 y)^2}$$



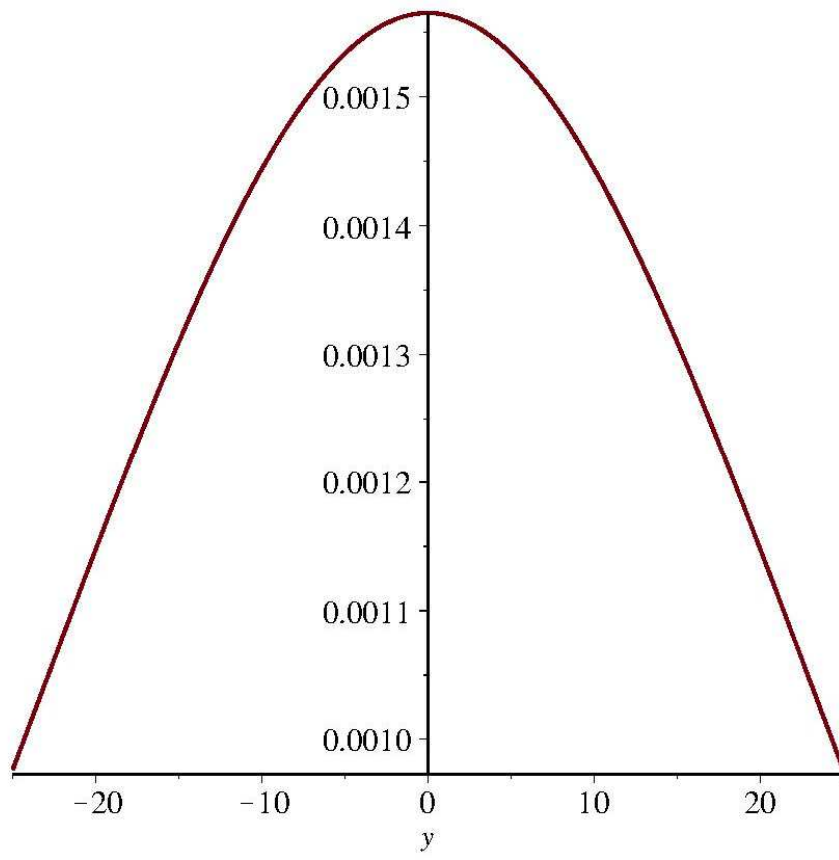
$$\frac{282}{\cosh(0.03546099291 y)^2}$$



$$\frac{316 \cdot 0.03164556962 y}{\cosh(0.03164556962 y)^2} + 0.001733299233$$



$$\frac{350}{\cosh(0.02857142857 y)^2} + \frac{0.001564921593}{0.02857142857 y}$$



Приложение Д. Программа расчета траекторий полета пылевой частицы при формировании веерной струи в узле загрузке бункера

restart;
 $a := 0.2 : d4 := 10 \cdot 10^{(-6)} : \rho4 := 2400 : \mu := 19 \cdot 10^{(-6)} : D1 := 15 : d0 := 0.08 : u0$
 $:= 15 : \rho := 1.2 : \beta := 45 :$

$$u\varphi0 := \frac{u0}{\tan\left(\text{evalf}\left(\frac{\beta}{180} \cdot \pi\right)\right)} :$$

$$Q := \text{evalf}\left(\frac{\pi \cdot d0^2}{4} \cdot u0\right) :$$

$$Jx := \rho \cdot Q \cdot u0 :$$

$$Mx := Jx \cdot \frac{d0 \cdot u\varphi0}{3 \cdot u0} :$$

$$A := \sqrt{\frac{3 \cdot Jx}{\text{evalf}(8 \cdot \pi \cdot \rho \cdot a^2)}} : B := \frac{1}{a} : C := \frac{3 \cdot Mx}{32 \cdot \rho \cdot a^2} \sqrt{\frac{8 \cdot \rho}{\text{evalf}(3 \cdot \pi \cdot Jx)}} :$$

$$A1 := \frac{A}{D1 \cdot u0} : A2 := \frac{a \cdot A}{D1 \cdot u0} : A3 := \frac{C}{D1^2 \cdot u0} :$$

$$Fr := \frac{9.81 \cdot D1}{u0^2} : St := \frac{d4^2 \cdot \rho4 \cdot u0}{18 \cdot \mu \cdot D1} :$$

$$z := (t) \rightarrow \frac{x2(t)}{a \cdot x1(t)} ;$$

$$t \rightarrow \frac{x2(t)}{a \cdot x1(t)} \quad (1)$$

$$z1 := (t) \rightarrow 1 + 0.125 \cdot z(t)^2 ;$$

$$t \rightarrow 1 + 0.125 \cdot z(t)^2 \quad (2)$$

$$f1 := (t) \rightarrow \frac{1}{z1(t)^2} ;$$

$$t \rightarrow \frac{1}{z1(t)^2} \quad (3)$$

$$f2 := (t) \rightarrow \frac{z(t)}{z1(t)} \cdot \left(\frac{1}{z1(t)} - 0.5 \right) ;$$

$$t \rightarrow \frac{z(t) \left(\frac{1}{zI(t)} - 0.5 \right)}{zI(t)} \quad (4)$$

$$f3 := (t) \rightarrow zI(t) \cdot fI(t); \quad t \rightarrow zI(t) fI(t) \quad (5)$$

$$f4 := (t) \rightarrow \frac{A1 \cdot fI(t)}{xI(t)}; \quad t \rightarrow \frac{A1 fI(t)}{xI(t)} \quad (6)$$

$$f5 := (t) \rightarrow \frac{A2 \cdot f2(t)}{xI(t)}; \quad t \rightarrow \frac{A2 f2(t)}{xI(t)} \quad (7)$$

$$f6 := (t) \rightarrow \frac{A3 \cdot f3(t)}{xI(t)^2}; \quad t \rightarrow \frac{A3 f3(t)}{xI(t)^2} \quad (8)$$

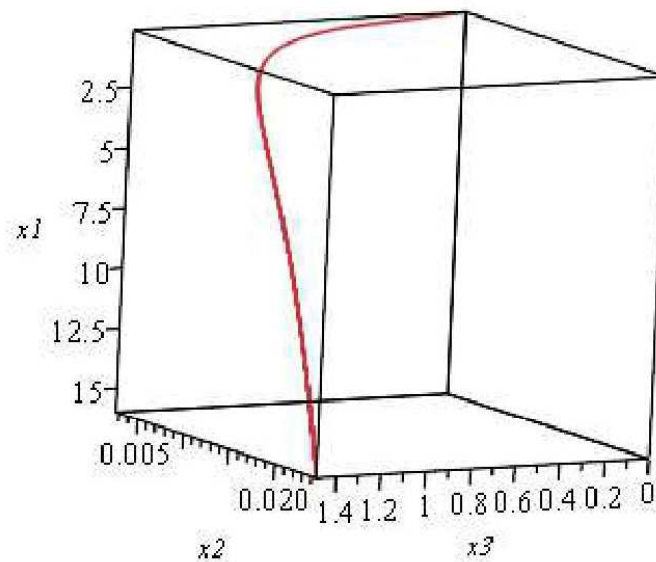
$$\begin{aligned} ODE := & D(x1)(t) = x4(t), D(x2)(t) = x5(t), D(x3)(t) = x6(t), D(x4)(t) = Fr + \frac{1}{St} \\ & \cdot (f4(t) - x4(t)), D(x5)(t) = x2(t) \cdot x6(t)^2 + \frac{1}{St} \cdot (f5(t) - x5(t)), D(x6)(t) = \frac{1}{x2(t)} \\ & \cdot \left(-2 \cdot x5(t) \cdot x6(t) + \frac{1}{St} \cdot (f6(t) - x2(t) \cdot x6(t)) \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(x1)(t) = & x4(t), D(x2)(t) = x5(t), D(x3)(t) = x6(t), D(x4)(t) = 0.6540000000 \\ & + \frac{11.63507628}{\left(1 + \frac{3.125000000 x2(t)^2}{xI(t)^2} \right)^2} xI(t) - 1425 x4(t), D(x5)(t) = x2(t) x6(t)^2 \\ & + \frac{11.63507629 x2(t) \left(\frac{1}{1 + \frac{3.125000000 x2(t)^2}{xI(t)^2}} - 0.5 \right)}{xI(t)^2 \left(1 + \frac{3.125000000 x2(t)^2}{xI(t)^2} \right)} - 1425 x5(t), D(x6)(t) \\ & = \frac{-2 x5(t) x6(t) + \frac{0.02585572508}{\left(1 + \frac{3.125000000 x2(t)^2}{xI(t)^2} \right) xI(t)^2} - 1425 x2(t) x6(t)}{x2(t)} \end{aligned} \quad (9)$$

```
ic := x1(0) = 0.1, x2(0) =  $\frac{d0}{2 \cdot D1}$ , x3(0) = 0, x4(0) = 0, x5(0) = 0, x6(0) = 0;
      x1(0) = 0.1, x2(0) = 0.0026666666666666, x3(0) = 0, x4(0) = 0, x5(0) = 0, x6(0) = 0      (10)
```

```
Fs := dsolve({ODE, ic}, {x1(t), x2(t), x3(t), x4(t), x5(t), x6(t)}, numeric, method
             = dverk78, output = listprocedure);
[t = proc(t) ... end proc, x1(t) = proc(t) ... end proc, x2(t) = proc(t) ... end proc, x3(t) =
  proc(t)
  ...
end proc, x4(t) = proc(t) ... end proc, x5(t) = proc(t) ... end proc, x6(t) = proc(t)
  ...
end proc]
```

```
plots[odeplot](Fs, [x1(t), x2(t), x3(t)], 0..10000, numpoints = 3000, color = orange, axes = boxed);
```



Приложение Е. Описание полезной модели к патенту RU 48318

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **48 318** (13) **U1**
 (51) МПК⁷ **B 65 G 69/18**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
 ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ(титульный лист)

(21), (22) Заявка: 2005117396/22, 06.06.2005

(24) Дата начала действия патента: 06.06.2005

(45) Опубликовано: 10.10.2005 Бюл. № 28

Адрес для переписки:

308012, г.Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
имени В.Г. Шухова, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Логачев И.Н. (RU),
 Овсянников Ю.Г. (RU),
 Семенов А.С. (RU),
 Никитенко Б.Л. (RU)

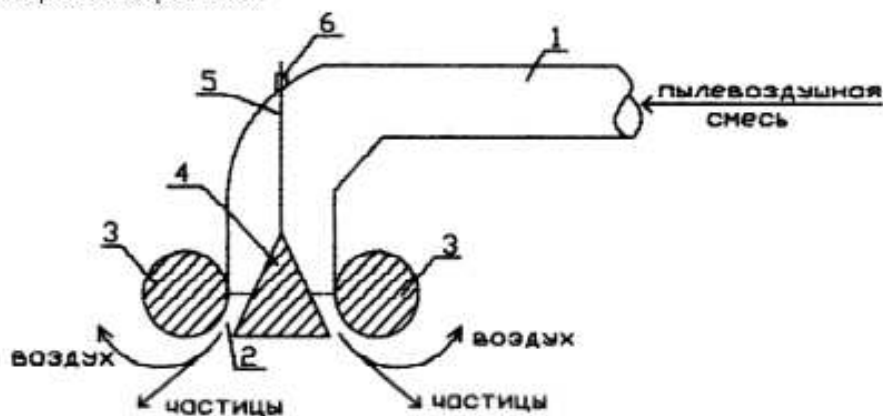
(73) Патентообладатель(ли):

Белгородский государственный
 технологический университет имени В.Г.
 Шухова (БГТУ имени В.Г. Шухова) (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЗАГРУЗКЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Формула полезной модели

Устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов, содержащее сопло и разделитель потока, отличающееся тем, что дополнительно содержит трубопровод пневмотранспорта, а сопло образовано тором и расположенным внутри тора на одной с ним вертикальной оси конусом, обращенным вершиной вверх, при этом тор является вышеуказанным разделителем потока и жестко закреплен на нижней части трубопровода, а вершина конуса связана с трубопроводом с возможностью вертикального перемещения и закрепления.



Приложение Ж. Извещение к патенту на полезную модель RU 48318

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **48 318** ⁽¹³⁾ **U1**
 (51) МПК⁷ **B 65 G 69/18**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
 ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ИЗВЕЩЕНИЯ К ПАТЕНТУ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

(21). (22) Заявка: 2005117396/22, 06.06.2005

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.06.2005

(45) Опубликовано: 10.10.2005

Адрес для переписки:
 308012, г.Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
 имени В.Г. Шухова, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Логачев И.Н. (RU),
 Овсянников Ю.Г. (RU),
 Семенов А.С. (RU),
 Никитанко Б.Л. (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Белгородский государственный технологический
 университет имени В.Г. Шухова (БГТУ имени
 В.Г. Шухова) (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЗАГРУЗКЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

QB1K - Регистрация лицензионного договора на использование полезной модели

(21) Регистрационный номер заявки: 2005117396

Лицензиар(ы): Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
 Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Вид лицензии*: НИЛ

Лицензиат(ы): Некоммерческое партнерство "Межрегиональное объединение ученых и специалистов в
 области строительного материаловедения"

Договор № РД0030949 зарегистрирован 25.12.2007

Извещение опубликовано: 10.02.2008 БИ: 04/2008

* ИЛ - исключительная лицензия НИЛ - неисключительная лицензия

RU 48318 U1

RU 48318 U1

Приложение 3. Описание полезной модели к патенту RU 161397

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **161 397**⁽¹³⁾ **U1**

(51) МПК
E21F 5/20 (2006.01)
B65G 21/08 (2006.01)
B65G 69/18 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015155457/03, 23.12.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.12.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.12.2015

(45) Опубликовано: 20.04.2016 Бюл. № 11

Адрес для переписки:

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
 им. В.Г. Шухова, отдел создания и оценки
 объектов интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Семенов Артем Сергеевич (RU),
 Логачев Иван Николаевич (RU),
 Кондрашева Мария Романовна (RU),
 Алифанова Алла Ивановна (RU)

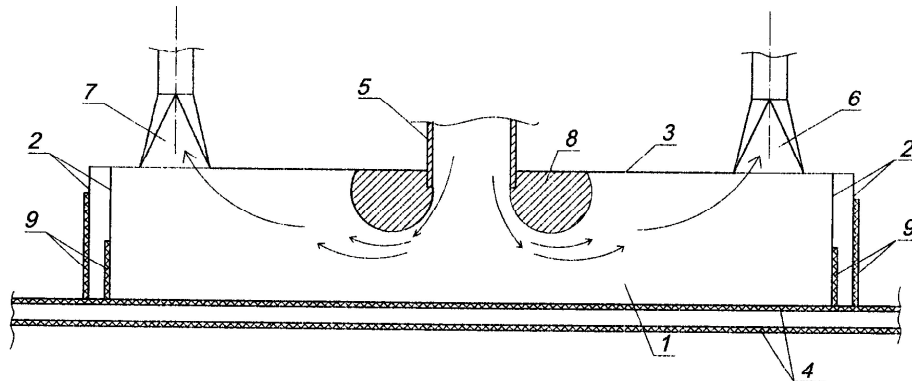
(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 профессионального образования
 "Белгородский государственный
 технологический университет им. В.Г.
 Шухова" (RU)

(54) АСПИРАЦИОННОЕ УКРЫТИЕ МЕСТ ПЕРЕГРУЗКИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

(57) Формула полезной модели

Аспирационное укрытие мест перегрузки сыпучего материала, содержащее короб, образованный торцевыми и боковыми стенками, крышкой, загрузочный желоб, аспирационную воронку и обтекатель, отличающееся тем, что на крышке с противоположной стороны от загрузочного желоба относительно аспирационной воронки установлена дополнительная аспирационная воронка.



RU 161397 U1

RU 161397 U1

Приложение И. Описание полезной модели к патенту RU 142259

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **142 259** (13) **U1**(51) МПК
E21F 5/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014105607/03, 14.02.2014
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:
14.02.2014
 Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 14.02.2014
 (45) Опубликовано: 27.06.2014 Бюл. № 18
 Адрес для переписки:
 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
 им. В.Г. Шухова, отдел создания и оценки
 объектов интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):
 Семиненко Артем Сергеевич (RU),
 Логачев Иван Николаевич (RU),
 Логачев Константин Иванович (RU),
 Аверкова Ольга Александровна (RU),
 Алифанова Алла Ивановна (RU),
 Попов Евгений Николаевич (RU),
 Киреев Виталий Михайлович (RU),
 Гольцов Александр Борисович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
 федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 профессионального образования
 "Белгородский государственный
 технологический университет им. В.Г.
 Шухова" (RU)

(54) АСПИРАЦИОННОЕ УКРЫТИЕ МЕСТ ПЕРЕГРУЗКИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

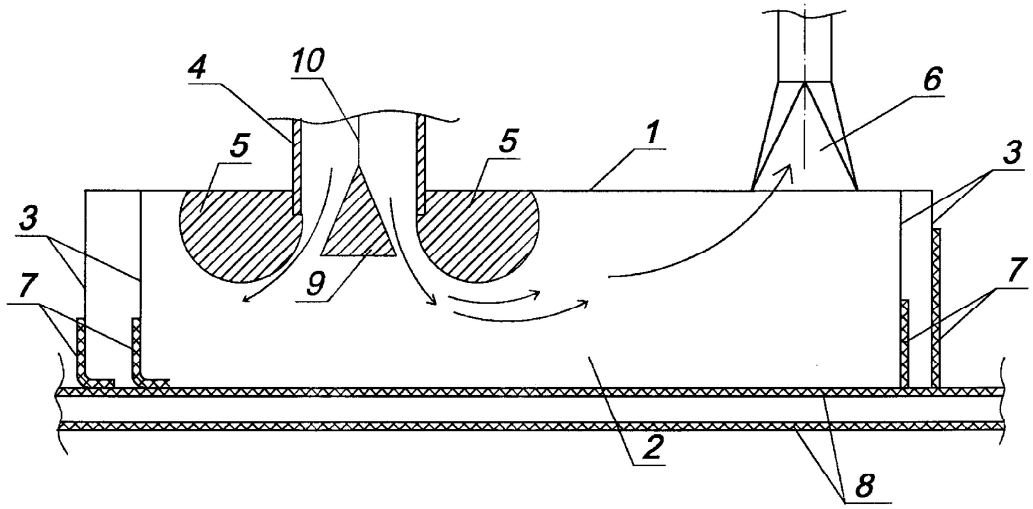
(57) Формула полезной модели

1. Аспирационное укрытие мест перегрузки сыпучего материала, содержащее короб, образованный торцевыми стенками, крышкой и боковыми стенками, расположенными под внутренним углом наклона менее 90° к верхней крышке, эластичные уплотнители, фартуки, закрепленные на торцевых стенках корпуса, аспирационную воронку и загрузочный желоб, отличающееся тем, что крышка содержит обтекатель, установленный у загрузочного желоба.

2. Аспирационное укрытие по п.1, отличающееся тем, что дополнительно содержит разделитель потока, образующий с обтекателем щелевое сопло на выходе из загрузочного желоба.

RU 142259 U1

RU 142259 U1



RU 142259 U1

RU 142259 U1

Приложение К. Описание полезной модели к патенту RU 177236

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **177 236**⁽¹³⁾ **U1**(51) МПК
E21F 5/00 (2006.01)
B65G 21/08 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B65G 21/08 (2006.01); *E21F 5/00* (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017112163, 10.04.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.04.2017

Дата регистрации:
14.02.2018

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 10.04.2017

(45) Опубликовано: 14.02.2018 Бюл. № 5

Адрес для переписки:
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
им. В.Г. Шухова, отдел создания и оценки
объектов интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):
Овсянников Юрий Григорьевич (RU),
Гольцов Александр Борисович (RU),
Семенов Артем Сергеевич (RU),
Киреев Виталий Михайлович (RU),
Бурьянов Иван Александрович (RU),
Жилина София Сергеевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г.
Шухова" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 161417 U1, 20.04.2016. RU
142259 U1, 27.06.2014. SU 1693260
A1, 23.11.1991. US 5868528 A1, 09.02.1999.

(54) УКРЫТИЕ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ АСПИРИРУЕМОГО ВОЗДУХА

(57) Реферат:

Полезная модель относится к средствам для обеспыливания воздуха при перегрузке сыпучего материала и может быть использована в промышленности строительных материалов, металлургической, горнорудной и др. отраслях народного хозяйства, где имеет место выделение пыли.

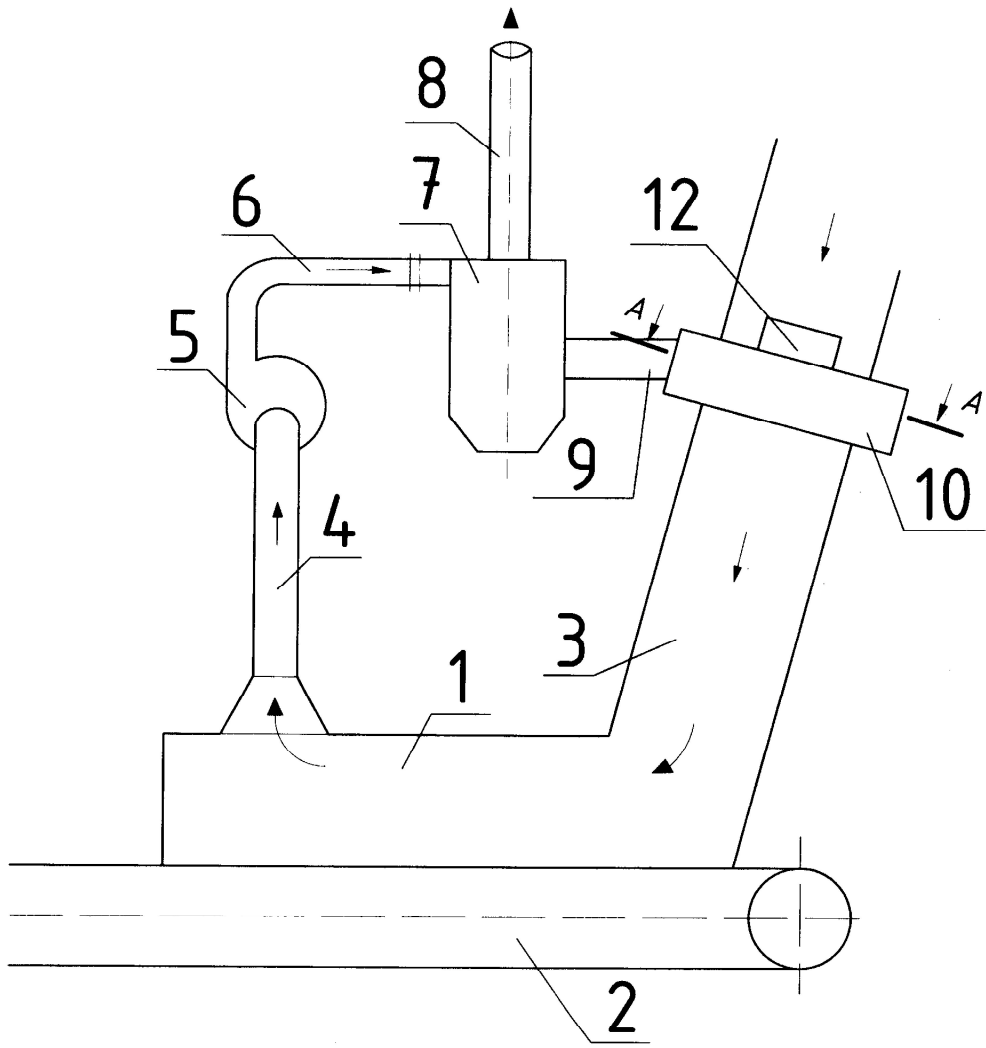
Задачей полезной модели является повышение эффективности ее работы за счет снижения расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом.

Это достигается тем, что укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха включает

короб 1, имеющий возможность соединения с вентилятором и пылеочистительным приспособлением соответствующими патрубками. Распределитель воздушно-пылевого концентрата 10, содержащий воздушные каналы 12 и выполненный в виде кольцевой камеры, опоясывает течку 3, которая соединена с воздушными каналами 12 и жестко закреплена к верхней части короба 1. В предложенном решении воздушные каналы 12 выполнены таким образом, что их форма обеспечивает возникновение эффекта Коанда.

RU 177236 U1

RU 177236 U1



Фиг. 1

RU 177236 U1

RU 177236 U1

Полезная модель относится к средствам для обеспыливания воздуха при перегрузке сыпучего материала и может быть использована в промышленности строительных материалов, металлургической, горнорудной и др. отраслях народного хозяйства, где имеет место выделение пыли.

5 Известно аспирационное укрытие узла перегрузки конвейеров с рециркуляцией аспирируемого воздуха [авт. св. на изобретение СССР № 1693260, МПК⁸ E21F 5/00, B65G 21/00, Подгорнев И.А., Овсянников Ю.Г., Трищенко С.А., Лапин О.Ф., Минко В.А., 23.11.91], включающее верхний и нижний короба, сообщенные между собой течкой, 10 вентилятор, сообщенный с пылеочистительным приспособлением и с аспирационным патрубком нижнего короба, обводную трубу и патрубок отвода очищенного воздуха, также укрытие снабжено распределителем воздушно-пылевого концентрата, размещенным в поперечном сечении течки, при этом пылеочистительное приспособление 15 выполнено в виде циклона-пылеконденсатора, один выход которого сообщен с патрубком отвода очищенного воздуха, а с другой через обводную трубу соединен с распределителем воздушно-пылевого концентрата, причем напорный патрубок вентилятора соединен с входом циклона-пылеконденсатора.

Недостатком этого технического решения является низкая эффективность работы аспирационного укрытия, вследствие высокого расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом при движении по течке.

20 Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату, принятым за прототип, является укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха [патент на полезную модель № 161417, РФ, МПК B65G 69/18, E21F 5/00, Гольцов Александр Борисович, Овсянников Юрий Григорьевич, Семиненко Артем Сергеевич, Емельянов Алексей Викторович, 20.04.16], содержащее короб, к верхней части которого жестко 25 прикреплена течка и аспирационный патрубок. К аспирационному патрубку последовательно присоединены вентилятор, напорный патрубок, пылеочистительное приспособление, один выход пылеочистительного приспособления соединен с патрубком отвода очищенного воздуха, а другой выход через обводную трубу соединен с 30 распределителем воздушно-пылевого концентрата. Распределитель воздушно-пылевого концентрата выполнен в виде кольцевой камеры, опоясывающей течку, содержит воздушные каналы, соединенные с течкой.

С существенными признаками полезной модели совпадает следующая совокупность признаков прототипа: короб, имеющий возможность соединения с вентилятором и 35 пылеочистительным приспособлением соответствующими патрубками, распределитель воздушно-пылевого концентрата, содержащий воздушные каналы и выполненный в виде кольцевой камеры, опоясывающей течку, которая соединена с воздушными 40 каналами и жестко закреплена к верхней части короба.

Недостатком этого технического решения является низкая эффективность работы аспирационного укрытия вследствие высокого расхода воздуха, эжектируемого сыпучим 45 материалом.

Задачей полезной модели является повышение эффективности ее работы за счет снижения расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом при движении по течке.

Это достигается тем, что укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха включает 45 короб, имеющий возможность соединения с вентилятором и пылеочистительным приспособлением соответствующими патрубками. Распределитель воздушно-пылевого концентрата, содержащий воздушные каналы и выполненный в виде кольцевой камеры, опоясывает течку, которая соединена с воздушными каналами и жестко закреплена к верхней части короба. В предложенном решении воздушные каналы выполнены таким

образом, что их форма обеспечивает возникновение эффекта Коанда.

Полезная модель поясняется чертежом: на фиг. 1 показан продольный разрез укрытия с рециркуляцией аспирируемого воздуха; на фиг. 2 - разрез А-А на фиг. 1 (продольный разрез распределителя воздушно-пылевого концентрата); на фиг. 3 - продольный разрез Б-Б на фиг. 2 (поперечный разрез распределителя воздушно-пылевого концентрата).

Укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха включает короб 1, устанавливаемый над приемником перегружаемого сыпучего материала, например, конвейерной лентой 2. К верхней части короба 1 жестко закреплены, например, фланцевыми соединениями, течка 3 и аспирационный патрубок 4. К аспирационному патрубку 4 последовательно присоединены, например, фланцевыми соединениями, вентилятор 5, напорный патрубок 6 пылеочистительное приспособление 7, например, циклон-пылеконцентратор. Один выход пылеочистительного приспособления 7 соединен, например, фланцевым соединением, с патрубком 8 отвода очищенного воздуха, а другой выход через обводную трубу 9 соединен, например, фланцевым соединением, с распределителем 10 воздушно-пылевого концентрата. Распределитель 10 воздушно-пылевого концентрата выполнен в виде кольцевой камеры 11, опоясывающей течку 3. При этом распределитель содержит Коандовские воздушные каналы 12, сообщающиеся с течкой 3 и соединенные с ней, например, сваркой. Коандовские воздушные каналы 12 выполнены криволинейной формы, содержащей выпуклую криволинейную поверхность, таким образом, что их форма обеспечивает возникновение эффекта Коанда.

Укрытие работает следующим образом.

При перегрузке, например, с конвейера (на фиг. не показан) в короб 1 сыпучий материал, например, железная руда, движется по течке 3, эжектируя воздух, создает воздушный запыленный поток. При падении сыпучего материала на конвейерную ленту 2 создается зона повышенного давления. Для обеспечения санитарно-гигиенических условий мест перегрузки сыпучего материала, т.е. не выбивания воздушного запыленного потока, из короба 1 вентилятором 5 через аспирационный патрубок 4 отсасывается воздух, который поступает по напорному патрубку 6 на вход пылеочистительного приспособления 7 для выделения воздушно-пылевого концентрата. Очищенный воздух по патрубку 8 поступает в атмосферу или в следующую ступень очистки (на фиг. не показана), а воздушно-пылевой концентрат благодаря обводной трубе 9 отводится в распределитель 10 воздушно-пылевого концентрата. Распределитель 10 воздушно-пылевого концентрата, выполненный в виде кольцевой камеры 11, обеспечивает подачу воздушно-пылевого концентрата в течку 3 через Коандовские воздушные каналы 12. При этом за счет их криволинейной формы, содержащей выпуклую криволинейную поверхность, обеспечивается возникновение эффекта Коанда, поток воздушно-пылевого концентрата «прилипает» к течке 3, что позволяет, по сравнению с прототипом и аналогом, увеличить угол между направлениями движения воздушно-пылевого концентрата и воздушного запыленного потока, движущегося в течке. Это объясняется тем, что с одной стороны струи воздушно-пылевого концентрата поверхность течки 3 препятствует свободному поступлению воздушного запыленного потока, а с другой стороны струи увлекается часть воздушного запыленного потока. В результате чего повышается аэродинамическое сопротивление течки 3, что обеспечивает снижение расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом при движении по течке 3, следовательно, уменьшается значение давления в зоне падения сыпучего материала на конвейерную ленту, а также объемы аспирируемого воздуха и пылевых выбросов в атмосферу.

Применение укрытия с рециркуляцией аспирируемого воздуха позволит повысить

RU 177 236 U1

энергоэффективность системы местной вытяжной вентиляции за счет снижения расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом при движении по течке и расхода аспирационного воздуха. Кроме того, снижение расхода аспирационного воздуха обеспечит уменьшение газопылевой нагрузки на пылеочистительное приспособление и вентилятор, в результате чего снизится энергопотребление системы.

(57) Формула полезной модели

Укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха, включающее короб, имеющий возможность соединения с вентилятором и пылеочистительным приспособлением соответствующими патрубками, распределитель воздушно-пылевого концентрата, содержащий воздушные каналы и выполненный в виде кольцевой камеры, опоясывающий течку, которая соединена с воздушными каналами и жестко закреплена к верхней части короба, отличающееся тем, что воздушные каналы выполнены таким образом, что их форма обеспечивает возникновение эффекта Коанда.

15

20

25

30

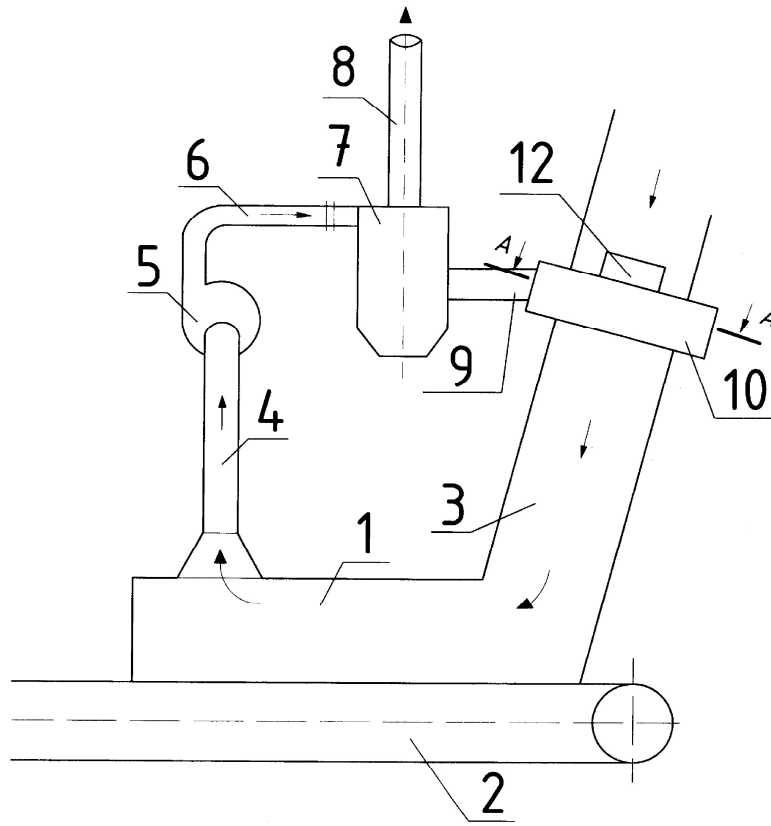
35

40

45

1

1
Укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха

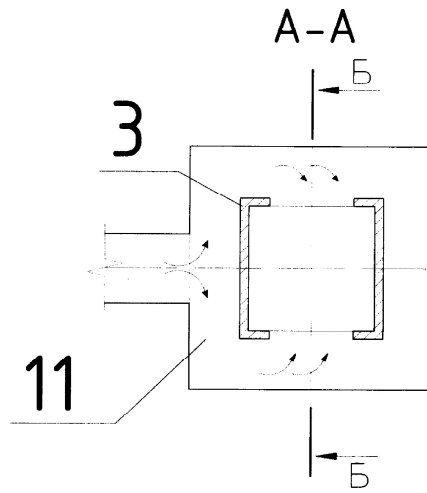


Фиг. 1

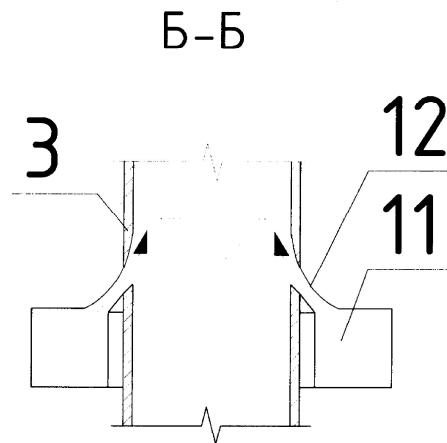
2

2

Укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха



Фиг. 2



Фиг. 3

Приложение Л. Копии документов о внедрении результатов диссертационного исследования

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ЗАО «Белгородский цемент»



Хлудеев В.И.

« 3 » ноября 2011 г.

АКТ

опытно-промышленных испытаний устройства для снижения
пылеобразования при загрузке сыпучих материалов

Опытно-промышленный образец устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов, разработанный на основе исследований, проведенных Семеновым А.С. под научным руководством доктора технических наук, проф. Логачева И.Н., новизна конструкции подтверждена свидетельством РФ на полезную модель № 48318 авторы Логачев И.Н., Овсянников Ю.Г., Семенов А.С. и др. (копия свидетельства прилагается), испытан с 17.10.2011г. по 31.10.2011г. в условиях загрузки цементного силоса, входящего в состав блока из четырех силосов диаметром 6 м ЗАО «Белгородский цемент».

Цель испытаний – определение эксплуатационно-технических характеристик устройства для снижения пылеобразования в условиях загрузки цементного силоса системой пневмотранспорта.

Устройство состоит конусообразного разделителя потока и тороидальной поверхности, соосно расположенных таким образом, что сопло, образованное ими, служит каналом для подачи цемента в бункер. Устройство крепится на крышке бункера соосно с загрузочным отверстием.

Испытаниями установлено, что устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов работоспособно и обеспечивает более качественную загрузку бункера.

Конструкция устройства показала свою функциональную завершенность, однако в результате исследований были предложены два узла, требующие доработки и модернизации.

На основании проведенных испытаний устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов пригодно для эксплуатации, является перспективной конструкцией и рекомендуется с доработкой к внедрению в промышленных условиях для транспортирования и хранения мелкодисперсных материалов.

Начальник цеха упаковки
ЗАО «Белгородский цемент»



Федирко И.М.

От разработчиков оборудования:



Логачев И.Н.



Семенов А.С.

Утверждаю

Директор ООО «Полимарк»

 Староверов С.В.

«26» апреля 2017 г.

АКТ

о внедрении в производство результатов диссертационной работы

Семенов Артема Сергеевича

Комиссия в составе:

председатель – главный инженер Пагин А.В.




члены комиссии – к.т.н., доцент Овсянников Ю.Г., ст. пр. Семенов А.С.

составили настоящий акт о том, что при разработке проектной документации систем обеспыливающей вентиляции цеха водосодержащих эмульсий филиала ООО «Тиккурила» по адресу: Белгородская обл., г. Старый Оскол, ул. Мебельная, 26 были использованы результаты диссертационной работы "Повышение эффективности систем вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов" соискателя ФГБОУ БГТУ им. В.Г. Шухова Семенов А.С.

Семенов А.С. предложены и разработаны конструкции загрузочных узлов бункеров, а также системы аспирации диссольтверов шпаклевки и мобильного бункера, в частности переточные каналы, объединяющие полости близстоящих диссольтверов, а также аналог устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов (патент 48318 RU)

Положительным эффектом от применения результатов исследований при проектировании систем местной вентиляции для диссольтверов шпаклевки «ПБ» и узла загрузки мобильного бункера является снижение запыленности на рабочих местах непосредственно у указанных аппаратов с 15,59 мг/м³ до 8,48 мг/м³.

Члены комиссии

 Пагин А.В.
 Овсянников Ю.Г.
 Семенов А.С.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

На правах рукописи



Семиненко Артем Сергеевич

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, доцент
Аверкова Ольга Александровна

Белгород - 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЫЛЕВЫДЕЛЕНИЙ ПРИ ЗАГРУЗКЕ БУНКЕРОВ.....	12
1.1. Технологические и компоновочные решения складов порошковых материалов	12
1.1.1. Бункера порошкообразных материалов, как источник пылевого загрязнения	12
1.1.2. Обзор научных исследований в области пылеобразования при перегрузках сыпучих материалов.....	16
1.2. Технические решения и методика расчета систем обеспыливающей вентиляции бункеров	20
1.2.1. Конструктивное оформление систем аспирации бункеров.....	20
1.2.2. Конструктивное оформление узлов загрузки бункеров.....	26
1.2.4. Методика расчета систем обеспыливающей вентиляции.....	31
1.3. Анализ закономерностей изменения направления воздушных струй, движущихся вдоль криволинейной поверхности	35
1.4. Выводы к главе 1	43
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В БУНКЕРАХ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ ЗАГРУЗКЕ.....	44
2.1. Основные уравнения динамики частиц	44
2.1.1. Силы, действующие на частицу	44
2.1.2. Уравнения динамики	46
2.1.3. Определение начальных условий.....	49
2.2. Поле скоростей воздуха при различном конструктивном исполнении загрузочных патрубков	51
2.2.1. Осесимметричная свободная струя.....	51
2.2.2. Плоская струя	56
2.2.3. Веерная слабозакрученная струя.....	59

2.3. Траектории частиц в полости бункера при различных схемах пневмозагрузки.....	66
2.4. Результаты исследований пылеаэродинамики бункеров при различных способах загрузки	69
2.5. Выводы к главе 2.....	73
3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА	74
3.1. Разработка принципиальной схемы узла загрузки бункеров, обеспечивающего снижение пылеобразования	74
3.2. План, программа и методика проведения экспериментальных исследований	79
3.2.1. Цели и задачи экспериментальных исследований	79
3.2.2. Планирование эксперимента	80
3.2.3. Описание экспериментальной установки.....	82
3.2.4. Методика проведения экспериментальных исследований.....	85
3.3. Результаты экспериментальных исследований условий реализации эффекта Коанда на разрабатываемом устройстве.....	86
3.4. Рациональные конструктивно-режимные параметры устройства.....	91
3.5. Выводы к главе 3.....	95
4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	97
4.1. Рекомендуемые схемы систем вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов.....	97
4.1.1. Техническое описание предлагаемых систем вентиляции.....	97
4.1.2. Методика расчета предлагаемых систем вентиляции.....	102
4.2. Обеспыливание цементных силосов ЗАО «Белгородский цемент»	106
4.2.1. Характеристика условий производства	106
4.2.2. Описание предлагаемого решения и результата	108
4.2.3. Расчет экономического эффекта от внедрения предлагаемых решений.....	110
4.3. Обеспыливание бункеров цеха водосодержащих эмульсий	114

4.3.1 Характеристика условий производства	114
4.3.2 Описание предлагаемого решения и результатов	116
4.3.3 Расчет экономического эффекта.....	119
4.4. Выводы к главе 4.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЯ	138
Приложение А. Список основных условных обозначений	138
Приложение Б. Программа расчета проекций скорости осесимметричной струи.....	141
Приложение В. Программа расчета проекций скорости плоской струи.....	152
Приложение Г. Программа расчета проекций скорости веерной струи	163
Приложение Д. Программа расчета траекторий полета пылевой частицы при формировании веерной струи в узле загрузки бункера.....	174
Приложение Е. Описание полезной модели к патенту RU 48318.....	177
Приложение Ж. Извещение к патенту на полезную модель RU 48318.....	178
Приложение З. Описание полезной модели к патенту RU 161397	179
Приложение И. Извещение к патенту на полезную модель RU 142259	180
Приложение К. Описание полезной модели к патенту RU 177236	182
Приложение Л. Копии документов о внедрении результатов диссертационного исследования	189

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В процессе перегрузок порошкообразных материалов (цемент; полевой шпат; металлическая пыль; известь; шлак; доломит; кальцит; зола; литейный песок и т.п.) возникают пылевые выбросы, наносящие значительный вред окружающей среде и человеку. С целью минимизации пылевых выбросов в атмосферу используют системы пневматического транспортирования, бункера для хранения материала и системы вентиляции для улавливания пылевых частиц. При пневмотранспортировании материал изолирован от рабочей среды, тем самым обеспечивается беспыльность транспортировки. Загрузка должна производиться в герметичные емкости, оснащенные системой обеспыливающей вентиляции. При этом нагрузка на систему обеспыливания увеличивается вследствие высокой скорости транспортирования потока сыпучего материала по сравнению, с другими способами транспортировки. Снижению нагрузки и повышению эффективности системы обеспыливающей вентиляции способствует снижение концентрации материала в аспирационном воздухе. Этого можно достичь путем организации воздушных потоков в полости бункера за счет модернизации узла загрузки. В настоящее время не уделяется должного внимания конструированию загрузочных узлов бункеров, которые с высокой степенью эффективности могут выполнять дополнительные функции, в том числе, сепарационную и обеспыливающую. В частности, снижение скорости запылённого воздушного потока в загрузочном узле может привести к значительному повышению эффективности системы обеспыливающей вентиляции.

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

Данное диссертационное исследование выполнялось в рамках следующих научных проектов: грант РФФИ № 14-41-18005 р_офи_м «Математическое моделирование процессов аспирации и разработка научных основ создания энергоэффективных систем локализации пылегазовых выделений»; грант РФФИ № 16-

08-00074а «Моделирование закрученных потоков в системах аспирации», грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-588.2012.8 «Разработка методов пыле- и газопылеулавливания в пыльных цехах промышленных предприятий»; НИР «Разработка методик расчета систем обеспыливания и исследование условий загрузки бункеров с учетом дисперсности материалов» в рамках реализации мероприятий Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012-2016 годы; НИР «Разработка энергоэффективных систем аспирации цементных складов силосного типа» в рамках реализации Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2017-2021 годы.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической базой исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых – Азарова В.Н, Богуславского Е.И., Боровкова Д.П., Вальдберга А.Ю., Гримитлина А.М., Зиганшина М.Г., Коузова П.А., Красовицкого Ю.В., Ливчак И.Ф., Логачева И.Н., Нейкова О.Д., Минко В.А., Посохина В.Н., Сатарина В.И., Страус В., Штокмана Е.А., Anderson D.M., Nath T., Nemeon W.C.L., Jones M.G., Bianconi W.O.A., Wyruch P.W., Xiaochuan Li и др.

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

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

Цель работы – повышение эффективности системы вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов за счет

совершенствования конструкции узла загрузки бункеров.

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

- провести анализ существующих систем обеспыливания бункеров, условий пылеобразования при загрузке порошкообразных материалов, конструктивного оформления загрузочных узлов, методики подбора и расчета эффективности работы основных элементов систем вентиляции, а также направлений их совершенствования;

- получить аналитические выражения динамики свободных струйных течений для различных вариантов конструктивного исполнения загрузочных узлов бункера;

- разработать конструкцию узла загрузки бункера и экспериментально доказать работоспособность технического решения, обеспечивающего снижение пылеобразование при пневмотранспортной загрузке материала;

- разработать математическую модель воздушного течения в загрузочном узле бункера, установить степень ее достоверности и адекватности, определить эффективные режимы работы разрабатываемого устройства;

- получить регрессионные уравнения, позволяющие определить рациональные геометрические характеристики устройства, обеспечивающих создание необходимых условий загрузки;

- разработать схемы и методики расчета систем вентиляции бункеров при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов, обеспечивающих снижение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе;

- провести промышленные испытания предлагаемых технических решений, выполнить их экономическое обоснование.

Объект исследования – системы вентиляции при пневмотранспортной загрузке бункеров порошкообразными материалами.

Предмет исследования – методы снижения пылеобразования и повышения эффективности систем вентиляции.

Научная новизна работы состоит в следующем.

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

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

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

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

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

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

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

теории пограничного слоя и классической аэродинамики.

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

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

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

Положения, выносимые на защиту:

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

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

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

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

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

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

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

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2005-2016 гг.), 1-ом Международном форуме Актуальные проблемы современной науки (Самара, СГАСА, 2005), Всероссийской научно-практической конференции «Современные

проблемы технического естественно-научного и гуманитарного знания» (Губкин, 2007 г.), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь в начале нового столетия» (Губкин, 2008, 2011, 2015 гг.), II Международной научно-практической конференции «Современные проблемы науки образования и производства» (Нижний Новгород: НФ УРАО, 2010 г.), Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям «Эврика» (Юж.-Рос. гос. ун-т. (НПИ), Новочеркасск, 2011 г.), Всероссийском конкурсе «Инновационный потенциал молодежи 2012» (Ульяновский государственный университет. Ульяновск, 2011 г.), Международной конференции «Экология и здоровье человека» (Маврикий, 2012 г.), Международной конференции «Perspective innovations in science, education, production and transport» (Одесса, 2013-2014 гг.), European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences (Vienna, Austria, 2014 г.), I Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой памяти д-ра техн. наук, профессора, А. А. Сандера «Энергосбережение и энергоэффективность на промышленных предприятиях и в жилищно-коммунальном хозяйстве» (Новосибирск, 2016 г.), региональной научно-технической конференции по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области (Белгород, 2017 г.).

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

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

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЫЛЕВЫДЕЛЕНИЙ ПРИ ЗАГРУЗКЕ БУНКЕРОВ

1.1. Технологические и компоновочные решения складов порошковых материалов

Применение бестарного приема и отпуска, хранения и транспортирования сыпучих материалов значительно повышает уровень автоматизации, механизации производства, производительности труда, позволяет снизить пылевой выброс вентиляционной сети, а соответственно уменьшить потери материала и улучшить санитарно-эпидемиологическую обстановку на рабочем месте [1]. Поэтому в состав большинства современных производств строительных материалов, металлургической, химической, пищевой промышленности входят такие технологические емкости, как бункера [2-4].

1.1.1. Бункера порошкообразных материалов, как источник пылевого загрязнения

Согласно современной теории бункеров [5] из процесса их эксплуатации выделяют три взаимосвязанных этапа: загрузка материала; хранение, обусловленное технологией производства; выгрузка. На каждом этапе возможно применение специальных устройств и приспособлений, которые могут улучшить функциональные возможности емкостей.

Так для загрузки возможно использование различных подъемно-транспортных машин: ленточных конвейеров, норий, шнекового и пневматического транспорта. Пневмотранспорт считается наиболее современным и чрезвычайно эффективным способом транспортировки сыпучих материалов [4, 6-7], обеспечивая не только высокую производительность, но и долговечность, чистоту и безопасность работы [7-9]. При пневмотранспортировании материал изолирован от рабочей среды, тем самым обеспечивается беспыльность транспортировки, благодаря чему отпадает надобность в больших эксплуатационных и капитальных затратах на вытяжные устройства [6]. Предприятия, которые производят строительные материалы, активно применяют

системы пневмотранспорта для транспортировки и смешивания сыпучих материалов, таких как цемент, полевой шпат, металлическая пыль, известь, шлак, доломит, кальцит, зола, литейный песок, порошковые пигменты, добавки и др. веществ.

Применение систем пневматического транспортирования на предприятиях производства строительных материалов объясняется спецификой производства и потребления, связанной с однообразием транспортных операций, а также единством физико-механических свойств различных продуктов производства, определяющим пневмотранспортный процесс [6, 10].

Рассмотрим специфику транспортировки и хранения в условиях цементного производства. Выбор технологии зависит от физических характеристик сырья, в качестве основных следует выделить: сухой [11-14], мокрый [15, 16], полусухой, комбинированный способы производства. От данного выбора зависит назначение, а, следовательно, и тип применяемых бункеров.

При производстве цемента по сухому способу [11-14] (рисунок 1.1.) сырьевые материалы измельчают в дробилках. Сырьевая мука направляется в гомогенизационные силоса (один из видов бункеров, характеризующихся большой высотой и диаметром), которые могут быть оснащены дополнительными бункерами тонкоизмельченных добавок. В данных емкостях сырьевая смесь перемешивается и корректируется, затем поступает в расходные бункера и далее во вращающуюся печь. Полученный клинкер измельчается и направляется в склад хранения готовой продукции.

Мокрый способ [15-16] (рисунок 1.2.) применяется при высокой влажности и не постоянном химическом составе сырья. Выходящий из печи клинкер охлаждается, поступает на клинкерный склад (группа бункеров), для выдержки в течение определенного времени. Что обеспечивает бесперебойную работу завода, поскольку хранение материала в бункере создает постоянный запас клинкера. Кроме того, в них хранятся необходимые минеральные добавки. Готовый цемент загружают в склад хранения готовой продукции (цементные силоса).

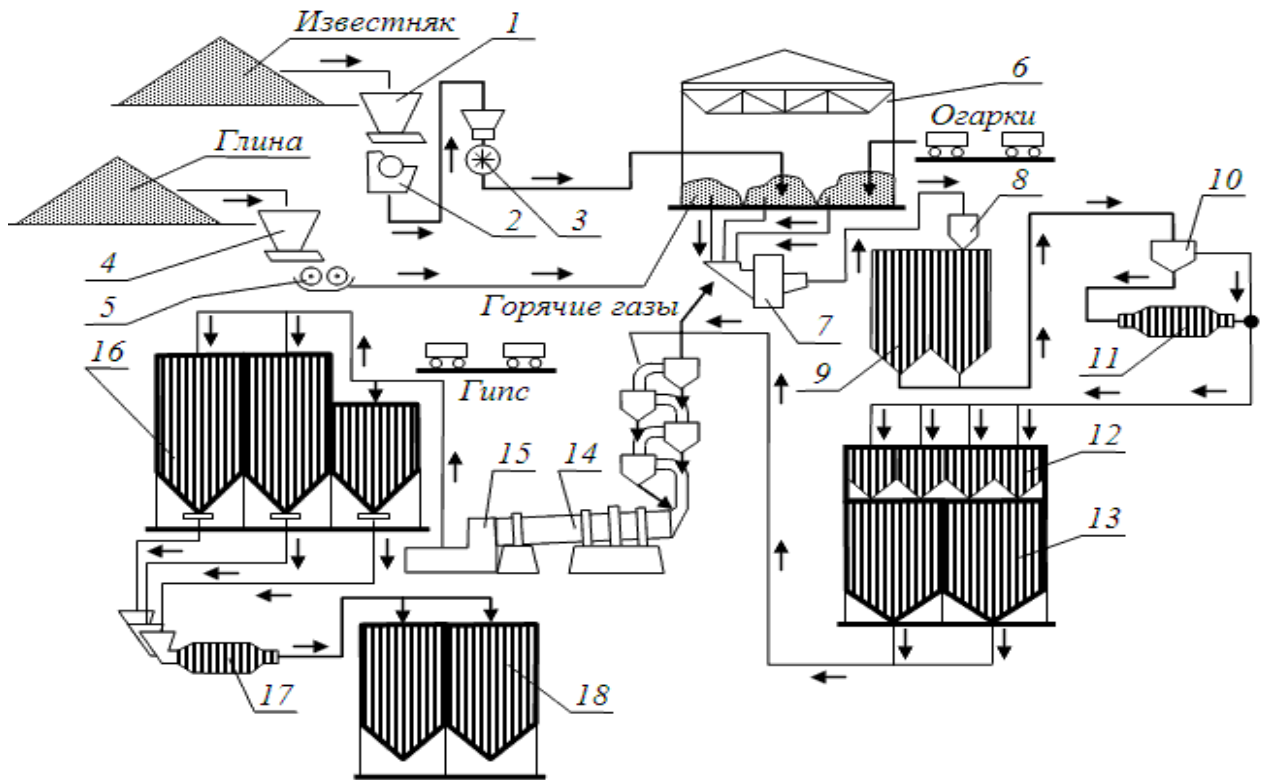


Рисунок 1.1. Технологическая схема цементного производства сухим способом:
 1,4 – сырьевые бункера (1 – известняк, 4 – глина); 2, 3, 5 – дробилки; 6 – склад сырья; 7, 11, 17 – мельницы; 8 – циклон-осадитель; 9 – промежуточный бункер; 10 – сепаратор; 12 – гомогенизационный бункер; 13 – запасной бункер; 14 – печь; 15 – холодильник; 16 – склад клинкера и добавок; 18 – склад готовой продукции

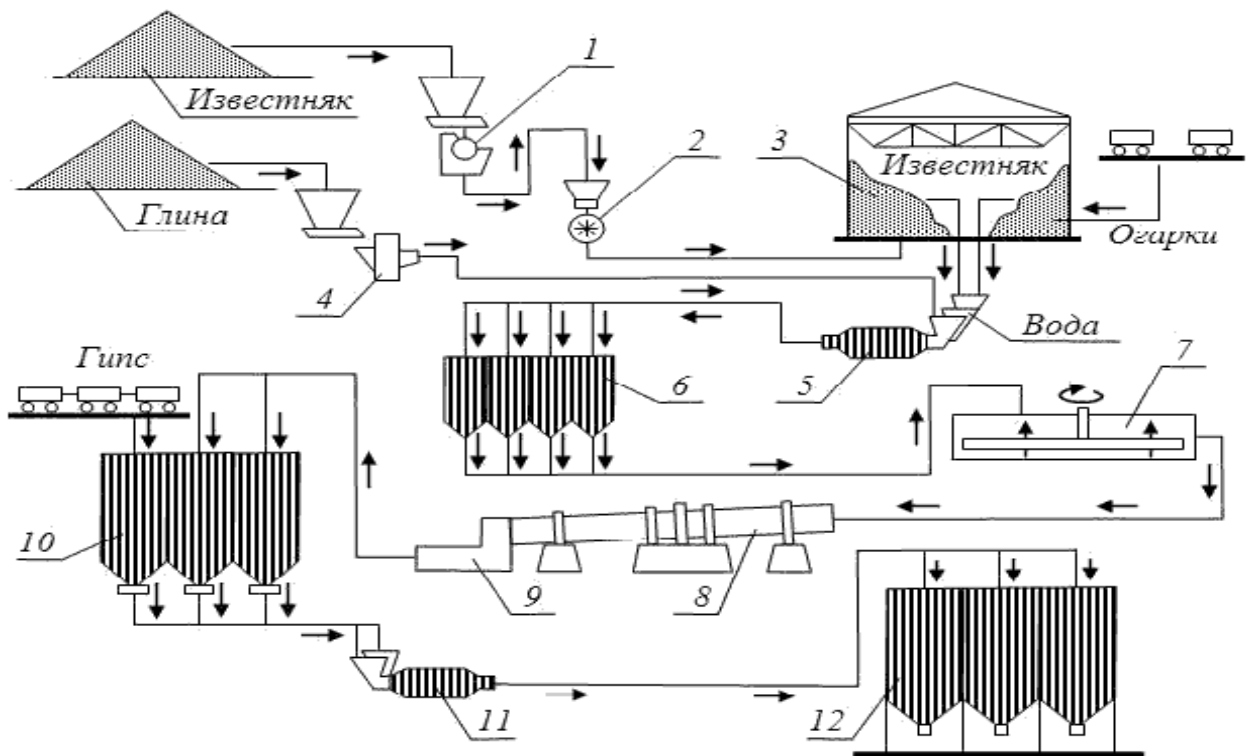


Рисунок 1.2. Технологическая схема цементного производства мокрым способом:
 1, 2 – дробилки; 3 – склад сырья; 4, 5, 11 – мельницы; 6, 7 – бассейны шлама; 8 – вращающаяся печь;
 9 – холодильник; 10 – клинкерный склад; 12 – склад готовой продукции

Таким образом, вне зависимости от способа производства цемента [17], технология диктует применение бункеров различного назначения, являющихся источниками пылеобразования [18, 19] вследствие локальных перегрузок пылящих (порошковых) материалов.

Особую актуальность системам обеспыливания придает то, что мелкодисперсная пыль обладает такими свойствами, как большая удельная поверхность, высокая адсорбционная способность, физическая и химическая активность, благодаря чему она легко проникает в организм человека, вызывая заболевания верхних дыхательных путей (хронический бронхит, бронхиальная астма, пневмокониозы), а также заболевания глаз, кожи и т.д. [20].

При реконструкции предприятий строительной промышленности [21], с целью повышения энергоэффективности, автоматизации, экологичности и безопасности внедряют системы автоматизации [22], пневмотранспорта [6, 23], аспирации [24, 25]. На рисунке 1.3 показан пример современного автоматизированного цементного производства.

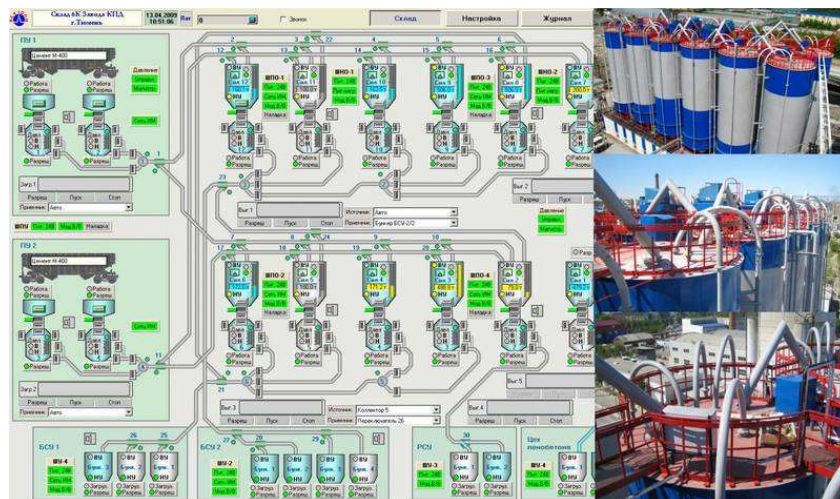


Рисунок 1.3. Пример мнемосхемы транспортировки и хранения цемента

Таким образом, не смотря на существенные различия в технологиях производства цемента можно сделать вывод, что применение комплекса герметичных бункеров и систем пневмотранспорта для хранения и транспортировки порошкообразных материалов имеет место в современном производстве, является экологичным, эффективным и актуальным техническим решением.

1.1.2. Обзор научных исследований в области пылеобразования при перегрузках сыпучих материалов

Процессам пылеобразования посвящено значительное количество научно-исследовательских трудов, в частности установлению условий и последствий образования пыли при перегрузках посвящены работы Бобровникова Н.А., Константинова А.Ф., Ларина Ю.А., Логачева И.Н., Минко В.А., Самсонова В.Т., Семенова А.М., Сервацка З. [2, 26-34], в которых выделены следующие особенности процесса: взаимодействие падающего материала с преградой; динамическое взаимодействие потока ускоренно падающего потока сыпучего материала и окружающей среды; эжекционная способность потока падающего материала; аэрирование падающего потока материала; влияние влажности сыпучего материала на его пылеобразующую способность; оседание частиц пыли.

При загрузке технологических емкостей (бункеров) основным местом пылеобразования так же является взаимодействие загружаемого потока с преградой (удар падающего материала о дно бункера, о слой ранее складированного (уложенного) материала и т.д.). Этому явлению посвящено существенное число работ: при работе конвейеров ленточного типа [2, 35], грейферных кранов [36, 37], а также при различных условиях взаимодействия падающего сыпучего материала (из трубопроводов пневмотранспортных установок или лент конвейеров) и преграды (дно технологических емкостей: бункера, вагона, трюма) [26-27, 34, 38, 39] и т.д.

В работах [40, 41] интенсивность пылеобразования, характеризующаяся концентрацией g (мг/с) пыли при взаимодействии материала с преградой в общем случае выражается:

$$g = f \left(E, \frac{v_k}{v_n}, Q_s, d, W \right), \quad (1.1)$$

где E - кинетическая энергия взаимодействия материала и преграды;

$\frac{v_k}{v_n}$ - отношение конечной и начальной скоростей материала; Q_s - количество

эжектируемого воздуха; d , W - характерный размер и влажность материала.

В работе [42] рассмотрено явление вертикального распределения концентрации g_h (мг/м³) пыли по высоте:

$$g_h = g_0 \exp(-n), \quad (1.2)$$

где g_0 - концентрация пыли в месте удара материала и преграды, приводящего ко взмётыванию материала; n - коэффициент распределения концентрации материала.

Эжектируемый расход воздуха $Q_э$ (м³/ч) при падении свободной струи, согласно работе [40], определяется из выражения

$$Q_э = Q_0 + Q_m, \quad (1.3)$$

где Q_0 - начальный расход воздуха в транспортирующем потоке, м³/ч; Q_m - расход воздуха, увлекаемого материалом, м³/ч. Величины Q_0 и Q_m определяются из выражений:

$$Q_0 = l \cdot q_э, \quad (1.4)$$

$$Q_m = v_э \cdot F \cdot 3600, \quad (1.5)$$

где l - характерная геометрическая характеристика поверхности потока, м;

$q_э$ - удельный расход воздуха, приходящийся на 1 м поверхности потока, м³;

$v_э$ - скорость воздуха, м/с; F - площадь поперечного сечения потока материала, м².

Отметим, что величины, входящие в уравнения (1.4) и (1.5) определяются по таблицам, данные для которых получены экспериментально, на моделях, как правило, в лабораторных условиях. Подобие (адекватность) моделируемых и натуральных процессов пылеобразования определяется критериями, основанными на теории размерностей и подобия, что характерно для физического моделирования. Они (методы) рассматриваются как приближенные, однако их значимость увеличивается при решении поисковых задач, когда структура и состав уравнений, описывающих процесс, не полны или не надежны. К числу таких задач относится пылеобразование при перегрузках порошкообразных материалов.

К фундаментальным трудам по теории подобия и методам моделирования следует отнести труды российских ученых Алабужева П.М., Бусленко Н.Н.,

Веникова В.А., Гухмана А.А., Кирпичева М.В., Седова Л.И. [43-47], а также работы зарубежных исследователей Клайна Д.С., Доула К., Майерса Дж. Е., Беннета К.О., и др. [48-51].

При физическом моделировании определяются факторы (физические параметры), позволяющие устанавливать подобие процессов, протекающих в условиях модель – натура при различных пропорциональных характеристиках. Качественные и количественные связи подобных явлений устанавливают в виде критериев подобия (укрупненных множителях основных физических параметров процессов). В соответствии с первой теоремой подобия численное равенство критериев подобия является необходимым условием подобия объектов [43-44].

В работе [28] указывается: «количество пыли, выделяющееся при свободном падении измельченного материала, зависит от расхода этого материала, его дисперсности, высоты падения и скорости организованного потока воздуха». Принятые автором критерии подобия предполагают использование в модельных исследованиях не основной материал, перегружаемый в том или ином производстве, а подобный натурному, т.е. его характеристики также должны соответствовать условию подобия. Такой подбор модельного объекта перегрузки связан с дополнительными исследованиями.

При определении скорости взметывающихся потоков необходимо учитывать результаты исследований [27, 52] в которых принято, что скорость потоков воздуха, образованных при ударе материала о преграду, будет близка к скорости свободного падения при столкновении с преградой.

Самсонов В.Т. в работах [33, 38, 52] указывает: «основной причиной пылеобразования при падении сыпучего материала является резкое уменьшение его пористости при встрече с преградой. Это приводит к образованию потоков воздуха, которыми и взвешиваются пылевидные частицы и распространяются в плоскости удара.» [52] При этом [38, 52] в качестве основных критериальных условий принимается геометрическое подобие модели и природы, а также критерий Фруда, отражающий соотношение инерции и сил тяжести для пылевоздушных потоков. В работе [33] отмечается: «скорость выхода воздушных струек из тела струи материала

в месте удара ее о преграду можно считать пропорциональной высоте падения» [33], данное утверждение основано на результатах опытов Калягина В.А. [53].

Известно исследование [28], посвященное оценке пылеобразования в результате соударения пневмотранспортного потока загружаемого материала и преграды в условиях загрузки судовых трюмов. Автор этой работы выделил три фазы процесса пылеобразования, аналитически определив концентрации пылевых потоков для каждой из них. Работа [28] основана на модельных исследованиях, в качестве условий подобия приняты геометрическое подобие и критерий Фруда. Однако использован натуральный сыпучий материал, что является нарушением модельного исследования принципа подобия явлений. Поэтому результаты исследований можно считать поисковыми, и требуют количественной оценки процесса пылеобразования в натуральных условиях.

Таким образом, основные рекомендации проведения модельного физического экспериментального исследования процессов пылеобразования при работе пневмотранспортных систем можно сформулировать так: выполнение модели геометрически подобной натурному объекту; использование натурального материала; соблюдение условий подобия падения и истечения материала в модели и натуре; соблюдение условий подобия взаимодействия пневмотранспортного потока о преграды, взметывания пылевых частиц в натуре и модели; соблюдение численно равных скоростей потоков.

В соответствии с данными исследованиями, основные факторы, влияющие на интенсивность пылеобразования можно разбить на три группы: конструктивные характеристики бункерных хранилищ; технологические параметры перегрузки; физико-механические свойства сыпучего материала.

Интенсивность распространения облака взвешенной пыли зависит от состояния воздушной среды вблизи источника пылеобразования, которое в свою очередь зависит от количества энергии, вносимой падающим материалом.

Значительное влияние на интенсивность пылеобразования оказывают технологические параметры перегрузки: начальная степень истечения, расход материала и транспортирующего воздуха, эжекционное давление, степень

заполнения бункера. Конструктивные характеристики бункерных хранилищ (геометрические характеристики бункеров, загрузочных устройств и т.п.) также вносят вклад на условия пылеобразования. Поэтому, с целью снижения количества образующейся пыли целесообразно, снижать не только высоту падения, начальный диаметр струи путем загрузки сыпучего материала несколькими струями меньших диаметров, но и предусматривать возможность организации воздухораспределения в полости бункера.

1.2. Технические решения и методика расчета систем обеспыливающей вентиляции бункеров

1.2.1. Конструктивное оформление систем аспирации бункеров

Из бункеров, наполняемых порошкообразными материалами, выделяется пыль [54-56], которая попадая в окружающую среду наносит экологический и социальный ущерб. Объясняется это тем, что движущийся материал эжектирует некоторое количество воздуха, при взаимодействии с поверхностью материала создается повышенное давление. В результате чего воздух взметывает частицы материала и стремится в зону более низкого давления (окружающую среду) [57].

Для того чтобы избежать выделения пыли из бункеров, их необходимо оснащать системами обеспыливающей вентиляции (аспирации) [2-3, 57-59]. Система аспирации – инженерная система, назначением которой является отведение и очистка запыленного воздуха от укрытий транспортно-технологического оборудования и рабочей зоны, которые необходимы на предприятиях, технологический процесс которых связан с выделением большого количества пыли, твердых частиц, газов и других вредных веществ [60-63].

Таким образом, аспирация, как процесс включает в себя 4 стадии: улавливание, транспортирование, очистку и рассеивание. В состав систем аспирации входят устройства для улавливания вредных примесей (различные отсосы и укрытия), воздуховоды, приемники отходов, вентиляторы, аппараты пыле-газоочистки и многое другое. Эффективность системы определяется по соотношению удаленных примесей к веществам, избежавшим утилизации и попавшим

в воздух рабочих помещений или окружающую среду [64-68].

При обеспыливании воздуха технологических устройств, оснащенных системой пневмотранспорта, выбор схемы и элементов аспирационных систем зависит от способа транспортирования материала [6, 8, 57, 69]: взвесью, плотным слоем, поршнями; вакуумным, нагнетательным или комбинированного [6, 7, 70]. На рисунке 1.4. показаны принципиальные схемы систем пневмотранспорта и аспирации при различных условиях движения материала.

Выбор обеспыливающего аппарата обусловлен физико-химическими характеристиками аспирационного потока, в частности дисперсного состава [71-72], плотности пылевых частиц, расхода, температуры потока воздуха [73-75]. При обеспыливании бункеров возможно применение индивидуальных и централизованных фильтров. Для обеспыливания воздуха от цементных силосов применяются как циклоны, рукавные фильтры, так и электрофильтры [76-78].

При использовании технического решения, показанного на рисунке 1.4 в цементной промышленности [11], в качестве обеспыливающего аппарата, как правило, принимаются циклоны ЦН-15. Место установки – надбункерная площадка, что обеспечивает разгрузку собранной пыли непосредственно в бункер. При недостаточной степени очистки у инерционного аппарата применяют двойную очистку: циклон-разгрузитель, циклон и рукавный фильтр [54, 58].

Типовые проекты систем вентиляции цементных силосов предусматривают установку противоточных рукавных фильтров, либо рукавные фильтры с авторегенерацией предложенные НИИцементом [57], устанавливаемые непосредственно на силосах. В этих фильтрах не предусмотрены процессы регенерации ткани, поэтому применяют рукава из гидрофобизированной стеклоткани, что обеспечивает периодический срыв накопившейся пыли без воздействия дополнительных устройств [77].

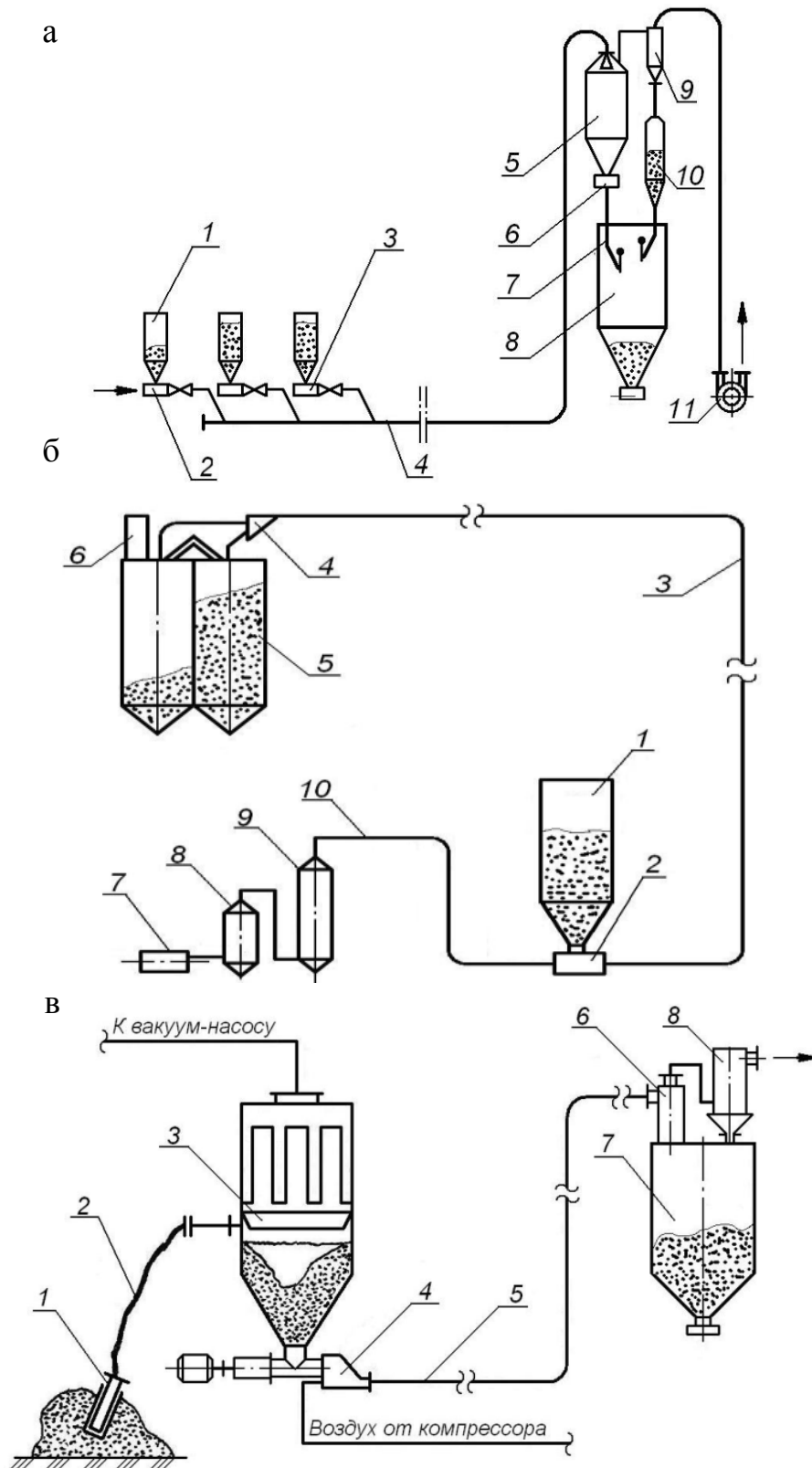


Рисунок 1.4 Принципиальные схемы систем пневмотранспорта и аспирации: а – при вакуумном способе загрузки: 1 – бункер, 2 – пылеприемная насадка, 3 – пробковый кран, 4 – транспортный трубопровод, 5 – осадительная камера, 6 – затвор, 7 – клапан-мигалка, 8 – сборный бункер, 9 – циклон, 10 – сборник пыли, 11 – вакуум-насос; б – при нагнетательном способе загрузки: 1 – бункер, 2 – пневмопитатель, 3 – трубопровод системы пневмотранспорта, 4 – переключатель потока, 5 – силос, 6 – рукавный фильтр, 7 – компрессор, 8 – влагомаслоотделитель, 9 – ресивер, 10 – воздухопровод; в – при комбинированном способе: 1 – заборное сопло, 2 – резино-тканевый рукав, 4 – пневмопитатель, 5 – транспортный трубопровод, 6 – циклонный разгрузитель, 7 – приемный бункер, 8 – рукавный фильтр

При установке централизованного рукавного фильтра на группу бункеров необходимо предусмотреть объединение полостей бункеров вентиляционными каналами [59], а также герметизацию бункеров, что обеспечит снижение нагрузки на обеспыливающий аппарат, а соответственно и долговечность ткани. Однако, такое решение, при установке фильтров типа СМЦ, выявило значительный недостаток: в связи со значительной концентрацией пылевых частиц рукава быстро забивались. Фильтр в лучшем случае играл роль пылесадительной камеры. Хотя современные фильтровальные ткани в большой мере позволяют избежать этого явления [32], но в связи с быстрым выходом из строя рукавов, а их стоимость чрезвычайно высока, производства, где имеются бетоносмесительные узлы не устанавливают вторую ступень очистки [79].

На рисунке 1.5 показан пример технического решения обеспыливающей вентиляции силосного склада цемента, при котором использован принцип буферного бункера и объединение полостей бункеров переточными каналами: «цемент из помольного цеха по аэрожелобам 1 поступает в приёмный бункер 2 пневматического насоса 3, к которому по воздухопроводу 4 подается сжатый воздух. Цемент в виде аэросмеси транспортируется насосом по цементопроводу 5. Из распределительного цементопровода 6 цементная аэросмесь через патрубки 13 направляется в силос 14. Скорость движения аэросмеси по трубопроводам от 15 до 25 м/с. Силосы соединены между собой трубопроводами 9, по которым воздух проходит из одного силоса в другой и через фильтры 8 удаляется из силоса в атмосферу. Наполнение силосов цементом контролируется уровнемерами 7» [80].

При загрузке в силосах образуется избыточное давление. Если полости цементных силосов соединены между собой воздухопроводами, то избыточное давление компенсируется посредством сброса воздуха из крайних бункеров в атмосферу, в некоторых случаях без пылеочистки [18].

Если бункера не объединены между собой вентиляционными каналами, то каждая емкость должна быть оснащена взрывными клапанами для сброса избыточного давления [19]. В этом случае при работе центрального пылеочистного аппарата возникает ряд проблем, связанных с не равномерностью потерь давления

в ответвлениях сети из-за различной протяженности, а соответственно и проблема с определением сечения данных воздуховодов, распределением вакуума, а также с вероятностью образования конденсации водяного пара на внутренней поверхности стенок.

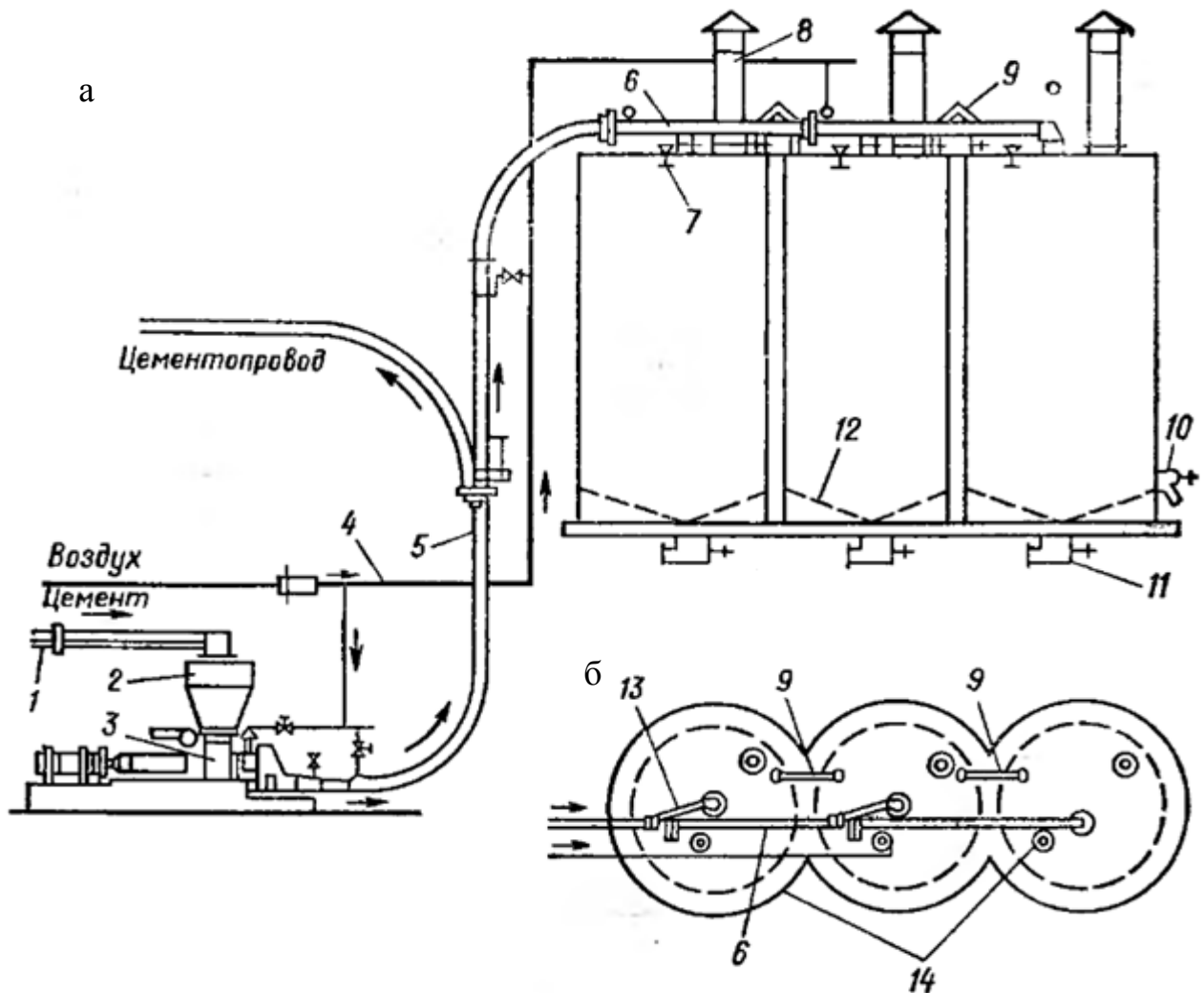


Рисунок 1.5. Силосный склад цемента: а – принципиальная схема установки и обвязки оборудования; б – фрагмент плана

При объединении полостей переточными каналами к недостаткам можно отнести то, что отсос аспирационного воздуха осуществляется из всех бункеров, включая загружаемый. Поскольку в нем происходят процессы вторичного пылеобразования при взаимодействии пневмотранспортного потока и уже складированного материала, то аспирационный воздух характеризуется повышенной запыленностью. Это приводит к интенсивному износу рукавного фильтра, а соответственно и снижению надежности его работы. Низкая надежность

устройств обеспыливания является причиной загрязнения рабочей зоны и окружающей среды.

Этот недостаток устраняется за счет того, что в группе бункеров, показанных на рисунке 1.6: «воздухозаборные трубопроводы одними концами параллельно подсоединены соответственно к первому и последнему в ряду силосам, а другие концы соединены с фильтром посредством элемента переключения, выполненного в виде шарнирно закрепленной задвижки. Элемент переключения работает так, что при загрузке первого и второго силосов элемент переключения подключает воздухозаборный трубопровод к последнему силосу. При загрузке последующих силосов забор воздуха ведется из последнего силоса до тех пор, пока суммарное количество силосов, начиная с загружаемого силоса до последнего не станет меньше их количества, начиная с первого до загружаемого» [81].

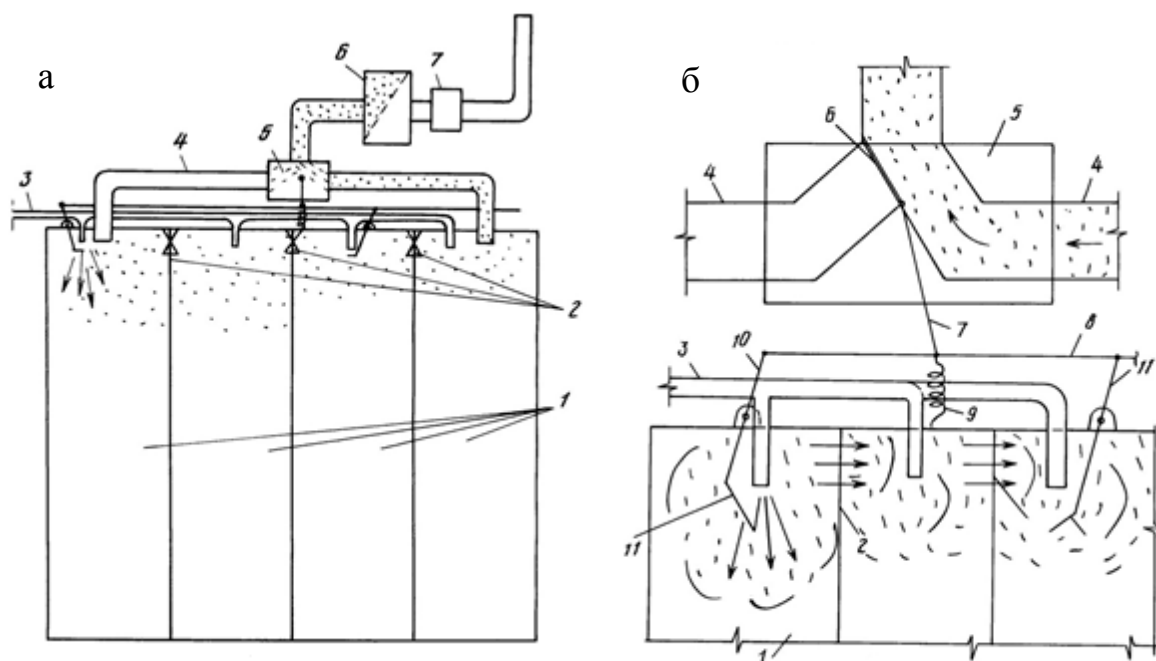


Рисунок 1.6. Хранилище для сыпучих материалов с пневмотранспортной загрузкой [1]:

а – хранилище; б – элемент переключения: 1 – бункер, 2 – воздушные каналы, 3 – трубопровод пневмотранспорта, 4 – воздухозаборный трубопровод, 5 – элемент переключения, 6 – рукавный фильтр, 7 – вытяжной вентилятор, 8 – тяга, 9 – пружина; 10, 11 – рычаги.

Таким образом, запыленный воздух из заполняемого силоса проходит через каналы в промежуточных силосах и, наконец, в последний, из которого производится отсос воздуха. В силосах, выполняющих роль пылесадительных камер, соединенных в каскад, происходит осаждение пыли, за счет снижения

скорости витания частиц пыли, и лишь мелкая пыль, на которую не действуют силы гравитации, попадает в рукавный фильтр. Получается двухступенчатая очистка воздуха от пыли: первая ступень – группа бункеров (как пылеосадительная камера большой длины), вторая – рукавный фильтр.

Следовательно, при проектировании систем обеспыливания аспирационного воздуха, отводимого от бункеров необходимо учитывать условия повышенного пылеобразования в загружаемом бункере, по возможности применять переточные каналы для снижения данного эффекта. Кроме того, нарушения работы систем вентиляции: «когда на предприятиях существующие системы аспирации цементных силосов не эксплуатируются, находятся в нерабочем состоянии, либо не обеспечивают требуемых аспирационных объемов» [19]. В результате чего, из бункеров, находящихся под избыточным давлением, из взрывных клапанов выбивается пыль, попадая в рабочую зону.

Рассмотренные системы аспирации бункеров, в частности цементных силосов, а также пути их усовершенствования, рекомендуются к применению, так как это позволит: усовершенствовать газоочистительную систему; снизить расходы на обслуживание системы аспирации; улучшить техническое оснащение; исключить выбросы газов и пыли в цех и окружающую среду; снизить потери продукта – сырья, с возвратом в производственный процесс.

1.2.2. Конструктивное оформление узлов загрузки бункеров

Конструкции применяемых аспирационных укрытий для бункеров зависят от способа их загрузки и разгрузки, а также и других факторов [26].

В работах [82-83] представлены классификации загрузочных устройств. Существующие классификации предусматривали рассмотрение загрузки обобщенно, на всех стадиях: с транспортеров, норий, отпускных труб и т.д. [84]. Предлагается рассмотреть классификацию по функциональному назначению устройств. Как правило, загрузочные устройства решают определенные технологические задачи, связанные с разгрузкой и хранением материала: «снижение насыпной плотности, увеличение статической нагрузки емкости, снижение сегрегации материала и др.»

[83]. Однако, режим работы загрузочных устройств так же влияет и на работу системы обеспыливающей вентиляции: уменьшая или увеличивая концентрацию частиц материала в аспирационном воздухе.

Обычно выделяют три способа загрузки бункеров различного назначения сыпучими грузами: струей (без дополнительных устройств), дождем (с использованием распределителей или разбрасывателей потока) и каскадная загрузка.

Шевандиной В.М. отмечено: «при заполнении силоса компактной струей (самотеком), происходит интенсивное оседание частиц груза, и в нижних слоях отмечаются большие сжатия и объемная плотность. При заполнении бункеров по методу разбрасывания (по типу дождя или душа), материал оказывается распределенным по поперечному сечению силоса с более равномерной плотностью» [85].

В работах [85-86] и др. отмечается, что при загрузке самотеком характерно расслоение материала (сегрегация): крупные и более округлые частицы по поверхности насыпи перемещаются к стенкам бункера. Кроме того, образуемая при этом насыпь (рисунок 1.7 а, б) снижает заполняемость бункера [86]. Наиболее простой (и наименее предпочтительной) является загрузка компактной струей. Такой способ характеризуется наибольшим количеством эжектируемого падающим материалом воздуха, а соответственно и повышенной интенсивностью пылеобразованием при соударении струи падающего материала со слоем ранее складированного (уложенного) материала или дном бункера.

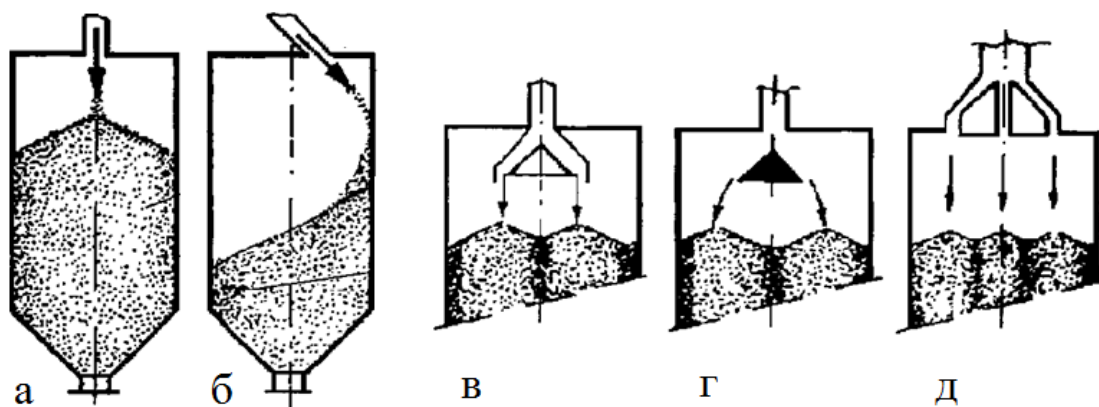


Рисунок 1.7. Способы загрузки бункеров: а - центральное заполнение; б - наклонной струей; в, г - заполнение разбрасыванием; д - заполнение в нескольких токах.

Для загрузки «дождем» (рассредоточенного потока), характерна равномерная укладка загружаемого материала. Отсутствие насыпи обеспечивает увеличение вместимости (относительно загрузки струей). Однако при незначительном рассредоточении загрузки может проявиться сегрегация (рисунок 1.7 в, г).

Существуют различные варианты классификации загрузочных устройств: по конструктивным особенностям [87], назначению [88], роду привода [89], и т.д. Представляется целесообразным классифицировать их по исполнению загрузки, а также налагаемых на них функциональным назначением, такая классификация представлена на рисунке 1.8.

Кроме того, следует учитывать и характер загрузки:

- равномерная, т.е. постепенное заполнение емкостей равномерной подачей материала (например, накопительных бункеров);
- с быстрым (залповым) заполнением, т.е. единовременное заполнение порцией материала всего объема закрытой полости или большей части ее.

Известно устройство для перегрузки сыпучего материала [2], соответствующее загрузке способом «дождем», за счет особого исполнения конструкции загрузочного узла, в нижней части которого закреплены две отводящие трубы с гофрированными стенками (рисунок 1.9 а). Благодаря этому решению имеется возможность выбора направления транспортирования материала.

Загрузочное устройство [91], исключает пылеобразование за счет снижения высоты падения материала. Его конструкция представлена на рисунке 1.9. б: материал, попадая в желоб, представляющий собой гофрированный желоб, по мере заполнения растягивает его. При достижении дна емкости, от соприкосновения с преградой открывается заслонка и обеспечивается перегрузка материала из желоба в бункер.

Загрузочное устройство [92], изображенное на рисунке 1.9. в, соответствует загрузке струей, однако благодаря своим конструктивным особенностям: оно состоит из цилиндрических труб, соединенных между собой хомутами с пропущенным через них тросом, обеспечивает исключение эжектирования окружающего воздуха, а также снижение высоты загрузки.

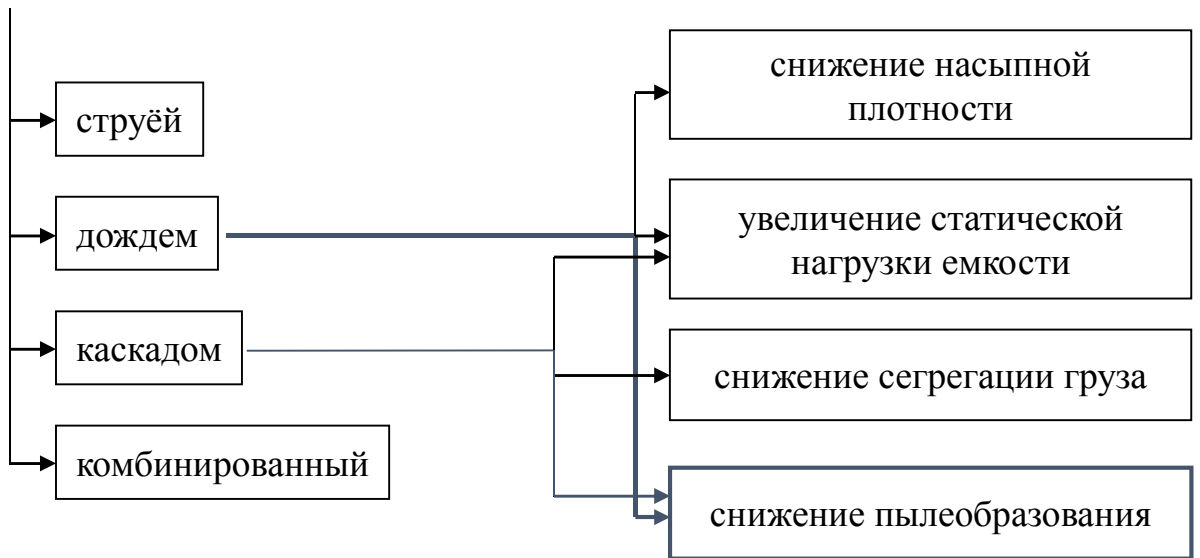


Рисунок 1.8. Классификация загрузочных устройств по исполнению загрузки

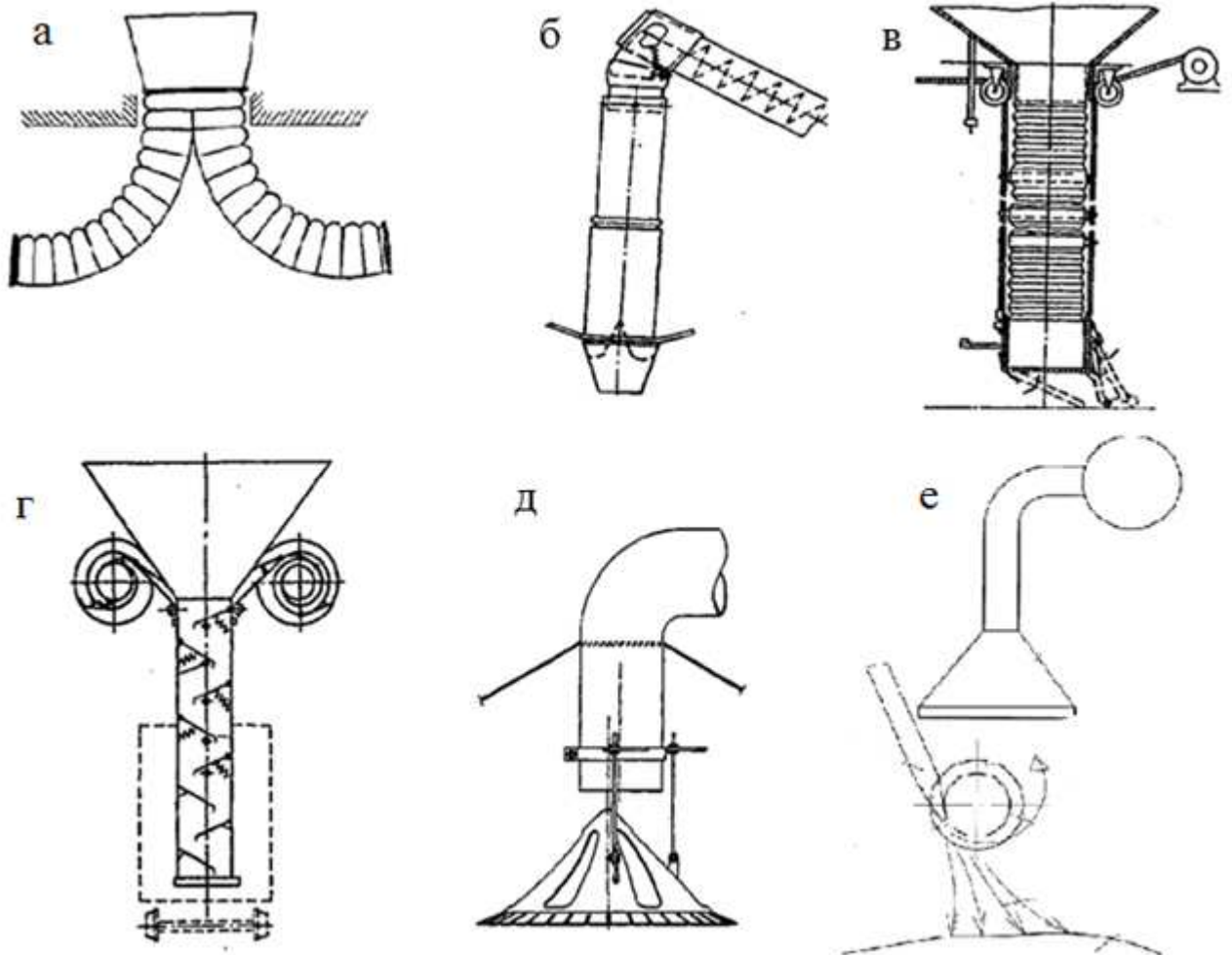


Рисунок 1.9. Загрузочные устройства различных типов: а - устройство для перегрузки сыпучего материала (а.с. 1615082 SU); б - гравитационный спуск (а.с. 1557021 SU); в - устройство для транспортирования сыпучих материалов (а.с. 1742169 SU); г - каскадное загрузочное устройство; д - устройство для распределения сыпучего материала в бункере (а.с. 1381039 SU); е - устройство для снижения пылеобразования (пат. 2185316 RU)

Применение каскадных загрузочных устройств [85] (рисунок 1.9 г) также обеспечивает снижение образования пыли вследствие уменьшения высоты свободного падения. Главным недостатком устройства является громоздкость конструкции, ограничивающая использование полезного пространства бункера.

Конусные распределители соответствуют исполнению загрузки типа «дождь». При их использовании снижается сегрегация материала и увеличивается равномерность заполнения бункера. Устройство [93], показанное на рисунке 1.9 д, состоит из распределительного конуса с отверстиями. В результате использования такого загрузочного устройства исключается конусообразная форма насыпи, а, следовательно, и сегрегация.

Основная задача загрузочного устройства [94], представленного на рисунке 1.9 е разделение потоков воздушной среды и потока материала, в результате данной сепарации снижается вторичное взметывание материала.

В результате проведенного аналитического обзора конструкций загрузочных узлов можно заметить прямую зависимость между повышением эффективности обеспечения качественных характеристик загрузки и повышением сложности конструкции и эксплуатации. При этом загрузочные устройства, задачей которых является повышение экологических характеристик, т.е. снижение пылеобразования, зачастую негативно влияют на другие технологические характеристики, такие как образование конусообразной насыпи и сегрегацию материала. Использование некоторых загрузочных устройств ограничено потребностью в дополнительной электроэнергии, поэтому для снижения энергоемкости процесса загрузки представляют интерес способы, сочетающие использование естественных сил гравитации и центробежных сил, создаваемых приводом рабочего органа устройства.

Таким образом, для повышения условий эксплуатации бункеров необходимо уделить внимание разработке эффективных конструкций загрузочных узлов, способствующих равномерной загрузке, отсутствию сегрегации и сохранности материала, т.е. исключению вторичного взметывания уже уложенного материала в бункере. При этом следует стремиться к минимальным затратам на производство и

обслуживание, учитывать конструктивные характеристики: оптимальные габариты, минимальное энергопотребление (или его полное отсутствие), высокую надежность, а также возможность влияния загрузочных устройств на улучшение санитарно-эпидемиологической обстановки в рабочей зоне.

1.2.4. Методика расчета систем обеспыливающей вентиляции

При загрузке бункеров с помощью системы пневмотранспорта учитывается количество сжатого воздуха, используемого для транспортирования материала, а также количество воздуха, вытесняемого загружаемым материалом :

$$Q_a = Q_{сж} + Q_m, \quad (1.6)$$

где $Q_{сж}$ - количество сжатого воздуха, приведенного к нормальному барометрическому давлению региона, где расположено промпредприятие, м³/ч.

Определяя расход аспирационного воздуха для бункеров, соединенных преточными каналами учитывается расход воздуха, поступающего из отводных труб Q_o [95]. Наибольший объем аспирации в этом случае будет при загрузке самого удаленного бункера. Количество воздуха, поступающего из заполняемого бункера в смежный бункер:

$$Q_{o3} = Q_{сж} + Q_m + Q_n. \quad (1.7)$$

Причем разрежение в полости смежного бункера будет выше на величину потерь давления в байпасе:

$$P_{\bar{o}} = P_a + \xi_n \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_{o3}}{S_n} \right)^2, \quad (1.8)$$

где ξ_n - коэффициент местного сопротивления канала, объединяющего полости смежных бункеров; S_n - площадь поперечного сечения данного канала, м².

Тогда объем аспирационного воздуха, удаляемого от бункера составит:

$$Q_a = Q_{o3} + F_H \sqrt{\frac{2P_{\bar{o}}}{\rho \cdot \xi_H}}, \quad (1.9)$$

В случае, если удаление воздуха производится не из смежного, а, например, N-ного бункера (обозначим загружаемый бункер ($Q_{o3} = Q_{o1}$)), имеем:

$$Q_a = Q_{o1} + \sum_{i=2}^N Q_{ni}, \quad (1.10)$$

$$Q_{ni} = F_{ni} \sqrt{\frac{2P_{\delta i}}{\rho \cdot \xi_H}}, \quad (1.11)$$

где Q_{ni} - расход воздуха, поступающего через неплотности i -го бункера (площадью F_{ni} , м²) под действием разрежения $P_{\delta i}$, определяемого по формуле:

$$P_{\delta i} = P_a + \sum_{j=1}^i \xi_{nj} \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_{oj}}{S_{nj}} \right)^2; \quad i = 2, 3, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, i. \quad (1.12)$$

При определении расхода аспирационного воздуха проходящего через переточные каналы Q_{oi} , его значение увеличивается на величину расхода, поступающего через неплотности предыдущих бункеров:

$$Q_{oj} = Q_{o1} + \sum_{k=1}^j Q_{nk}, \quad k = 2, 3, \dots, j. \quad (1.13)$$

Когда бункер используют для хранения порошкообразных материалов, которые, как известно, склонны к слеживанию, для повышения текучести материала и предупреждения образования «мертвых» остатков днища емкостей оборудуются системами аэрации. Они обычно состоят из ряда воздухораспределительных коробок (аэрокоробок), уложенных и закрепленных к днищу. Потребный расход сжатого воздуха на аэрацию, учитываемый в воздушном балансе бункера, определяется по формуле:

$$Q_{aэ} = q_{aэ} \cdot F_{aэ}, \quad (1.14)$$

где $q_{aэ}$ - удельный расход сжатого воздуха (для цементных силосов нм³/мин на 1 м² площади аэрации группы аэрокоробок, в которую сжатый воздух подается поочередно с интервалами 5-10 минут); $F_{aэ}$ - полезная площадь аэрации группы аэрокоробок, обычно он равна 70-80 % от площади аэрокоробок, м².

Таким образом, расчет по приведенной методике позволяет наиболее точно определять объемы аспирационного воздуха, удаляемого из полости бункера, в целях предотвращения выбивания запыленного воздуха в атмосферу.

Основной задачей проектирования систем пылеочистки является удовлетворение требований по эффективности очистки выбросов по остаточной концентрации (C_K) с наименьшими затратами, обеспечение надежности работы пылеуловителей и удобство их эксплуатации.

Расчет эффективности пылеочистки, в основу которого положен логарифмически нормальный закон распределения частиц пыли по размерам и зависимость эффективности пылеулавливания от диаметра улавливаемых частиц называется вероятностным методом НИИОГАЗА [96]. Согласно которого степень очистки пылеуловителя окончательно рассчитывается по зависимости:

$$\eta_{\text{общ}} = \Phi(t) = \frac{1}{2} \pi (\exp)^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (1.15)$$

где $\Phi(t)$ - интеграл Гаусса, который определяется по специальным вероятностным таблицам; параметр t , определяется по формуле:

$$t = \frac{\lg d_{50} - \lg d_{\#50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_n + \lg^2 \sigma_{\#}}}, \quad (1.16)$$

где σ_n , d_{50} – параметры дисперсности пылевых частиц

После определения группу пыли по её дисперсности, выбирается класс и тип пылеуловителя, необходимый для достижения требуемой эффективности пылеулавливания. При выборе типа пылеуловителя учитывают следующие показатели: степень пылеулавливания, сопротивление пылеуловителя, от которого зависит экономичность процесса пылеулавливания; габаритные размеры и масса пылеуловителя, надежность и простота его обслуживания.

Аэродинамический расчет сети производится с целью определения суммарного давления, соответствующего расчетному расходу воздуха по всем участкам. Аэродинамический расчет систем аспирации рекомендуется проводить по методу скоростных (динамических) давлений, в котором потеря давления на трение заменяется эквивалентной потерей давления на местные сопротивления. Металлические воздуховоды систем аспирации следует предусматривать только их прямых участков, отводов, тройников и крестовин круглого сечения [97].

При перемещении малозапыленного воздуха с концентрацией массы смеси (отношением массы транспортируемого материала к массе воздуха) $\mu < 0,01$ кг/кг, потери давления на участке вентиляционной сети определяется по формуле:

$$P = (\xi_{\vartheta} + \sum \xi) P_{\vartheta}, \quad (1.17)$$

где ξ_{ϑ} – приведенный коэффициент трения,

$$\xi_{\vartheta} = \frac{\lambda}{d} l. \quad (1.18)$$

Минимальная скорость движения воздуха в воздуховодах в зависимости от характера транспортируемого материала принимается по технологическим данным соответствующих отраслей промышленности. Скорость движения воздуха в воздуховодах должна быть более скорости витания частиц транспортируемого материала.

При перемещении воздуха с концентрацией массы смеси более 0,01 кг/кг потери давления в сети на трение, местные сопротивления и подъем транспортируемых с воздухом примесей P_n (кгс/м²) определяются по формуле:

$$P_n = 1,1 \sum [P(1 + K\mu)] + \sum l_g \vartheta, \quad (1.19)$$

где K – опытный коэффициент, зависящий от характера транспортируемого материала. Величины K и μ принимаются по технологическим данным соответствующих отраслей промышленности; l_g – длина вертикального участка воздуховода, м; ϑ – объемная концентрация смеси, равная отношению массы транспортируемого материала к объему чистого воздуха.

При расчете воздуховодов систем аспирации сначала определяют расход транспортируемого материала и количества транспортирующего воздуха, исходя из рекомендуемой концентрации массы смеси. При отсутствии данных о количестве транспортируемого материала расход воздуха определяется исходя из минимально допустимого диаметра воздуховода (80 мм) и скорости движения воздуха.

Воздуховоды систем аспирации рассчитываются из условия одновременной работы всех отсосов. Неувязка потерь давления по отдельным участкам сети

должна быть не более 5 %.

Регулирование потерь давления задвижками или дроссельными клапанами не допускается. Для увязки потерь давления допускается:

- увеличивать количество воздуха, удаляемого от того или иного отсоса;
- устанавливать диафрагмы на вертикальных участках систем аспирации при сухой неслипающейся и не волокнистой пыли.

Расчетная производительность вентиляторных агрегатов систем аспирации принимается с учетом подсоса или потери воздуха в системах [97]. Поскольку основными потребителями электроэнергии в системах аспирации являются тягодутьевые средства, то основными мерами, направленными на повышение энергосбережения являются: минимизация объемов аспирации и минимизация потерь давления в элементах сети [98].

1.3. Анализ закономерностей изменения направления воздушных струй, движущихся вдоль криволинейной поверхности

Одним из рациональных и перспективных способов организации движения воздушных потоков с целью разделения потоков сыпучего материала и транспортирующего воздуха при пневмотранспортном складировании в бункерах является введение в состав обеспыливающей вентиляции загрузочных устройств, использующих эффект Коанда.

Согласно сложившейся научной терминологии под термином "эффект Коанда" подразумевают несколько различных аэрогидродинамических явлений [99], названных по имени румынского изобретателя, который нашел им практическое применение, разработав несколько устройств [100-104], использующих один или несколько следующих свойств потока.

1. Тенденция струи жидкости, приближающейся к криволинейной поверхности, оставаться прикрепленной к ней – эффект пограничного слоя, который характеризует широкий спектр природных явлений.

2. Способность струи жидкости присоединяться к близлежащей поверхности.

3. Свойство струйных потоков (наиболее часто используется в аэродинамике),

движущихся у выпуклых криволинейных поверхностей, эжектировать окружающую среду, изменяя при этом направление движения.

Несмотря на широкое использование эффекта Коанда в различных отраслях техники [105-107], а также посвящения международных проектов и конференций [108-109], тем не менее, часто отмечается недостаточность информации о поведении коандовских течений [79, 110].

Наиболее значительное распространение эффект получил в струйной пневмоавтоматике [111-114], но в создании значительной теоретической базы, для данной отрасли техники, не было необходимости, поскольку определяется лишь конечное положение струи: наличие отклонения от первоначального направления.

Эффект Коанда имеет место и в теплоэнергетике: он наблюдается при работе камерных топков всех конструкций. Несмотря на это теоретическое его изучение в данной области весьма незначительное, стремясь создать условия для исключения возможности появления коандовских течений [106].

Исключительную роль эффект Коанда играет в вентиляции, «где без его учета невозможно надежное проектирование эффективных вентиляционных систем в зданиях и помещениях» [105].

Одним из фундаментальных научных трудов, посвященных эффекту Коанда является работа Newman [115-116], содержащая результаты исследования двумерного течения вокруг кругового цилиндра (схема течения приведена на рисунке 1.10). Newman отметил что эффект Коанда при движении по криволинейной поверхности является следствием баланса центробежной силы и радиального давления [115, 117]. При выходе струи из сопла, из-за наличия вязкого сопротивления потока и твердой стенки, его контактное давление с поверхностью ниже, чем давление окружающей среды. Этот перепад давления является основной причиной сцепления потока и криволинейной поверхности. Контактное давление вдоль поверхности увеличивается и постепенно достигает значения атмосферного, что обуславливает отрыв струи от поверхности.

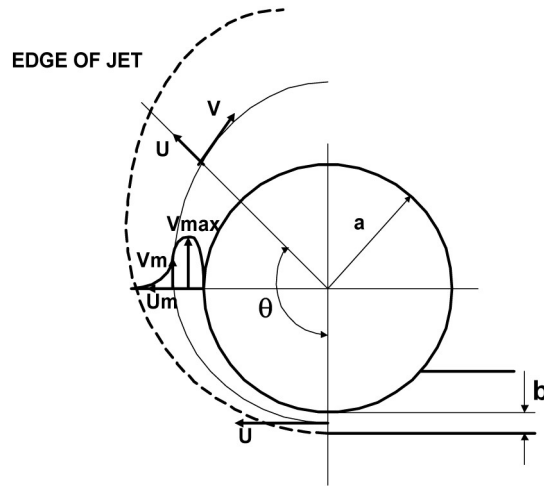


Рисунок 1.10. Схема экспериментальной установки Newman [115]

Bradshaw [118] объяснил эффект Коанда в условиях безвихревого невязкого потока: предполагая поток изначально невязким, описал поведение потока неравенством давлений потока и окружающей среды:

$$\frac{\rho \cdot U^2 \cdot b}{a} < p_{\infty} \quad (1.20)$$

где: ρ - плотность потока, U - скорость, b - ширина щели сопла, a - радиус кривизны поверхности (см. рисунок 1.10).

Неравенство Bradshaw является не точным, поскольку в реальных вязких течениях прилипание струи жидкости с криволинейной поверхностью вызывает увеличение толщины струи, движущейся вдоль поверхности с уменьшением средней скорости из-за неблагоприятного градиента давления. При этом средняя скорость уменьшается, а давление потока у стенки увеличивается и в конечном итоге становится равным атмосферному, что и приводит к отрыву от поверхности [118]. Таким образом, Bradshaw показал действие эффекта Коанда для невязких течений в соответствии с балансом центробежных сил, и выявил причины отделения струи от криволинейной стенки в действии вязких эффектов.

Другое объяснение эффекта Коанда для прикрепления вязкой струи жидкости к поверхности дали Patankar U.M. [119] и Rask R.B. [120]: цилиндр препятствует вовлечению (эжекции) окружающей среды в струйное течение, что вызывает уменьшение давления у поверхности и торможение потока.

Таким образом, для описания любого двумерного коандовского течения,

например, показанного на рисунке 1.10, в качестве основных геометрических параметров выделим: угол отрыва θ ; ширину сопла b ; радиус кривизны a , а также физические параметры движения потока: число Рейнольдса Re , перепад давления $p_s - p_\infty$, (где p_s – давление на срезе сопла). При этом следует учитывать утверждение [117? 121-122] о независимости турбулентного течения от вязкости при больших значениях критерия Рейнольдса, при нахождении окружающей среды в состоянии покоя. Таким образом, перепад давления становится независимым параметром на некотором расстоянии от среза сопла по течению потока.

По результатам аналитического исследования коандовских течений при высоких числах Рейнольдса Newman [115] предложил уравнение для определения угла отрыва в зависимости от перепада давления, геометрических характеристик и свойств жидкости:

$$\theta_{sep} = f \left[\left(\frac{(p_0 - p_\infty) \cdot b \cdot a}{\rho \cdot v^2} \right)^{0.5} \right]. \quad (1.21)$$

Согласно уравнению (1.21) для вязкого течения можно получить угол отрыва около 240° . Данный результат подтвержден экспериментально и другими исследователями: Fekete [123] получил угол отрыва в 210° , а Rask [120] – 225° .

Wille и Fernholtz [108] предположив, что геометрия выхода сопла является основным фактором создания коандовского течения, перешли от предположения о радиальной форме осевой линии струи [115] к логарифмически спиральной кривизне струи. Проведя серии экспериментов при различных способах истечения, показанных на рисунке 1.11 определили, что небольшой уступ (высота = $0.03 b$), размещенный на внешней кромке сопла может увеличить угол отклонения.

Некоторые из экспериментов были повторены Giles и другими соавторами [124], подтвердив результаты исследований Wille и Fernholtz, продемонстрировав подчинение коандовских струй закону сохранения импульса.

В своей работе Newman и Guitton [125] пересмотрели логарифмически спиральную концепцию, приняв утверждение Giles и др. о сохранении импульса структуре струи, распространяющейся по логарифмическим спиральям, однако они

обнаружили значительные расхождения экспериментальных и аналитических результатов, определяемых уравнениями движения (см. рисунок 1.12). Newman [126] произвел также обзор течений турбулентных криволинейных коандовских течений, отметив преобладающее значение импульса струи над силами трения с поверхностью. Он предположил, что при высоких числах Рейнольдса силы вязкости и трения незначительны.

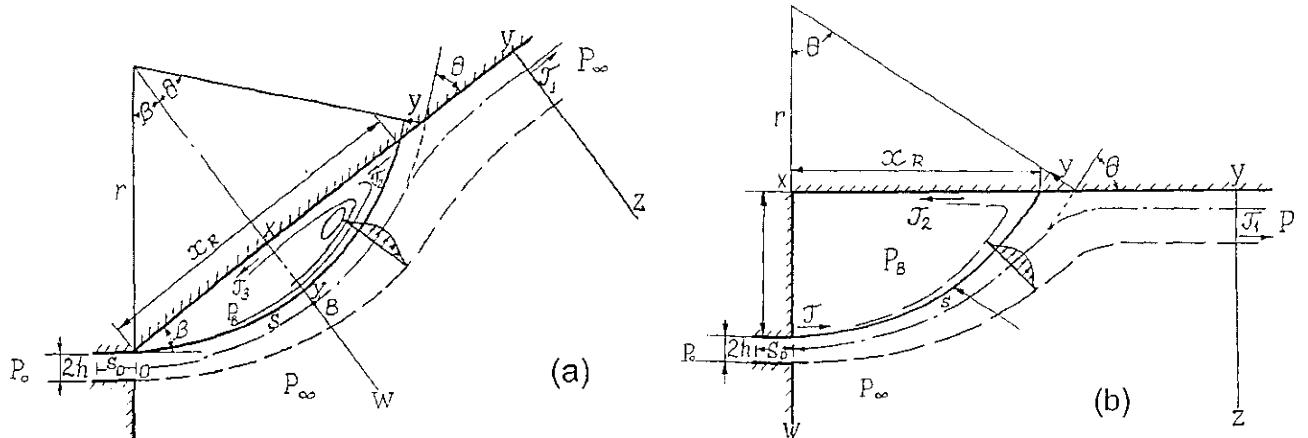


Рисунок. 1.11. Схема коандовского течения: а - для наклонной плоскости; б - для параллельной плоскости при наличии уступа.

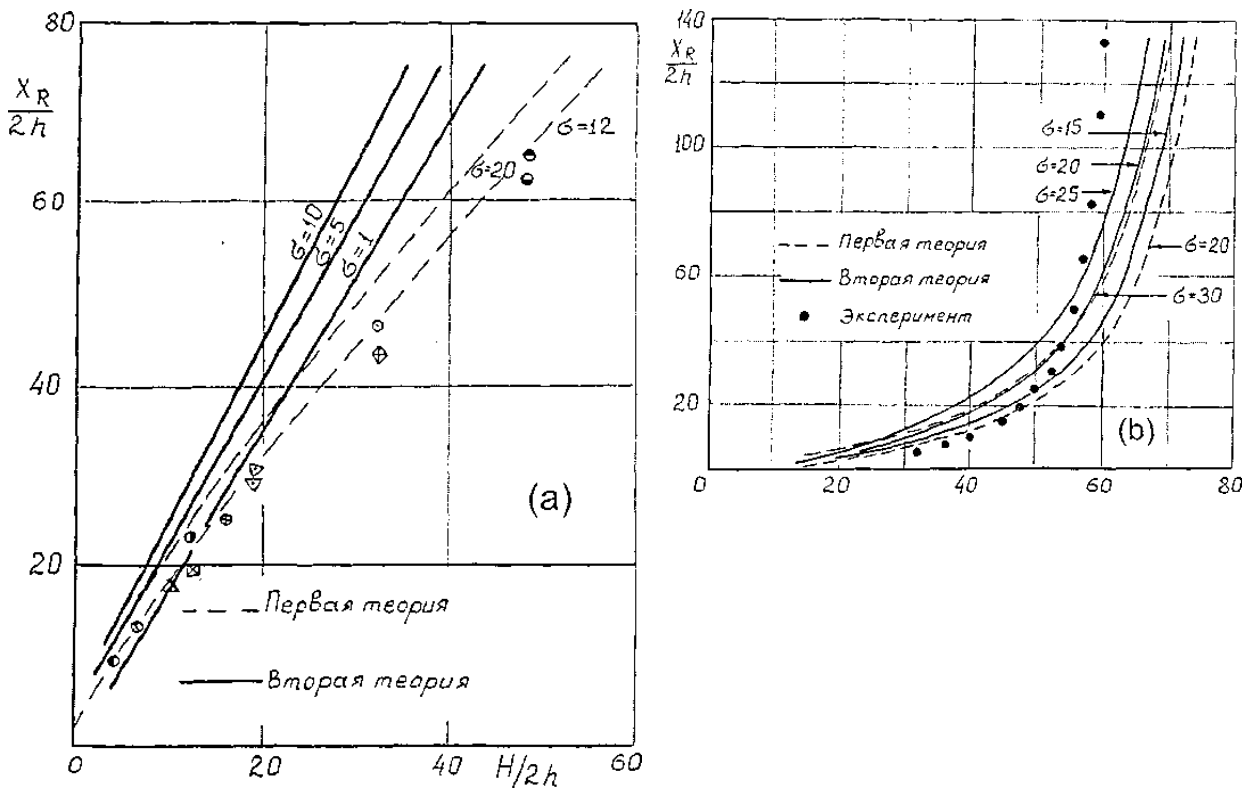


Рисунок 1.12. Координата точки присоединения струи по данным Newman:

а) - истечение параллельно плоскости при наличии уступа; б) - при истечении под углом к плоскости

Neuendorf и Wygnanski [127] уточнили предыдущие исследования коандовских турбулентных двумерных течений у криволинейной поверхности. Используя камеру статического давления они устранили ошибку, приводившую к более раннему отрыву струи от криволинейной поверхности, показав, что «разность давлений между камерой осаждения и помещением была меньше динамического давления»:

$$p_0 - p_\infty < \frac{1}{2} \rho \cdot U_{jet}^2 . \quad (1.22)$$

Neuendorf и Wygnanski дали классификацию зон коандовских течений: пограничный слой на криволинейной поверхности; слой смешения на противоположном крае потока; центральная часть струи потока, которая практически и не влияет на пограничный слой и слой смешения вследствие своей невязкой и безвихревой структуры.

Для полноты обзора по двумерным коандовским течениям также отметим эксперименты в сверхзвуковых характеристиках, основоположниками таких исследований считаются Bevilaqua и Lee [128], Gregory-Smith [129-130], Gilchrist [130], Hawkins [121], Cornelius и Lucius [122], Carpenter [131] и др.

Первые эксперименты с трехмерным коандовским течением были проведены Patankar и Sridhar [119], которые исследовали трехмерные эффекты турбулентных, несжимаемых, искривленных пристеночных струй. Экспериментальная установка была аналогична установке, представленной на рисунке 1.10, однако введена координата z для ограничения размера струи (рисунок 1.13). Patankar и Sridhar изменяя пропорции сопла (15.6, 10.0, 5.0, 2.5 и 1.0), сохраняли площадь сопла и начальную скорость постоянной. Коэффициент сжатия был определен Patankar как длина d к ширине b сопла. При проведении эксперимента радиус кривизны a изменялся. Одно из главных сделанных наблюдений заключалось в том, что при использовании прямоугольного потока угол отрыва был значительно сокращен, по сравнению с двумерным вариантом. Как соотношение сторон, так и радиус продемонстрировали большое влияние на значение угла отрыва. Наиболее влияющим параметром является соотношение сторон. Установлено, что угол

разделения увеличивается как с соотношением сторон, так и с радиусом кривизны. Rask [120] в своей работе подтвердил результаты исследований Patankar и Sridhar.

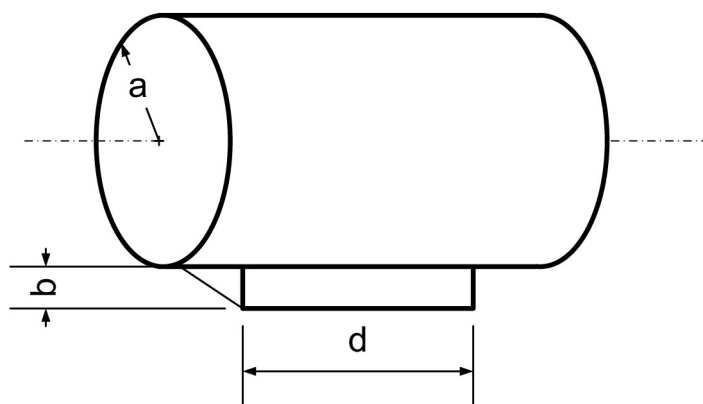


Рисунок 1.13. Схема экспериментальной установки, используемой Patankar

Juvet [132] провел исследование на осесимметричной струе, формируемой окружным соплом, при этом первичный поток, выходит из сопла большого диаметра D с центром в торе, а вторичный поток – по окружности, касательной к криволинейной поверхности ($D \gg b$, см. рисунок 1.14). Juvet проводил эксперимент с постоянными соотношением $b / a = 0.031$, коэффициент обдува – отношение объемного расхода вторичного потока к расходу первичного потока изменялся от 0 до 0.15, что соответствует значениям коэффициента импульса между 0.0 и 0.33. Соответственно при нулевом расходе вторичного потока коандовского течения не наблюдалось, при увеличении расхода налипание струи происходило более интенсивно.

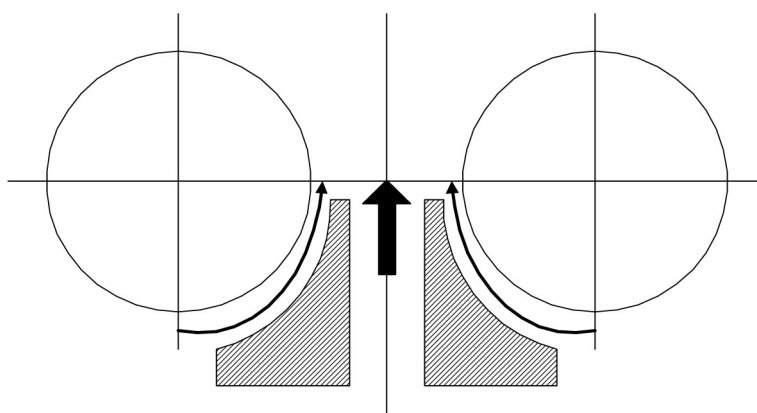


Рисунок 1.14. Схема экспериментальной установки Juvet

В качестве отечественных исследователей эффекта Коанда следует отметить коллектив ученых ЦАГИ: Гиневским А.С., Сыч. В.М. и др. разработан

интегральный метод расчета пристенных турбулентных струй, распространяющихся в спутном потоке [133], исследованы течения у криволинейных поверхностей [134-136]. Сычевым В.В., Петровым, А.В., Шеломовской В.В. рассмотрены способы управления пограничным слоем для предотвращения отрыва потока [137-138]. Эффект Коанда экспериментально исследован Соколовой И.Н. в работе [139] установлены зависимости отрыва потока при различных начальных давлениях, геометрических размерах струй и расстояний между соплом и криволинейной поверхностью, обнаружены гистерезисные явления в поведении коандовских течений. В работе [140] исследована возможность использования эффекта для уменьшения воздействия струи на преграду, приведены исследования поведения коандовских течений при экстремальных условиях: сверхзвуковых скоростях [141], при нагревании до 600 °С [142], отмечено, что и горячие коандовские струи обладают определенной автомодельностью.

Ганич Г.А., Гущина Н.А., Жулев Ю.Г. провели серию экспериментов для изучения зависимости степени проявления прямоугольных коандовских течений от геометрических параметров сопла и от угла выдува струи к плоской поверхности [143]. Интенсификацией эффекта Коанда для струй из осесимметричных сопел путем создания продольных вихрей занимались Жулев Ю.Г., Макаров В.А., Наливайко А.Г. [144-146].

Исследованиям распространения струи по криволинейной поверхности также посвящены труды Акатнова В.И. [147-148].

Таким образом, использование эффекта Коанда позволяет повысить эффективность вентиляционных сетей за счет снижения концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе. Приведенные конструкции обеспыливающих аппаратов используются на предприятиях по производству строительных материалов для пылеочистки.

1.4. Выводы к главе 1

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

1. Применение комплекса герметичных бункеров, систем пневмотранспорта и обеспыливающей вентиляции для хранения порошкообразных материалов имеет место в современном производстве, является экологичным, эффективным и актуальным техническим решением.

2. Повышению эффективности системы аспирации способствует снижение концентрации материала в аспирационном воздухе, что обеспечивает снижение запыленности на рабочих местах в цехах, а также пылевой нагрузки на обеспыливающий аппарат и энергопотребление системы вентиляции.

3. При загрузке бункеров главным фактором пылеобразования является взаимодействие пневмотранспортной струи материала с преградой (удар о дно бункера или слой ранее складированного (уложенного) материала и т.д.).

4. Предложен способ снижения пылеобразования при загрузке материалов в бункер, а, соответственно, и снижение концентрации материала в аспирационном воздухе, заключающийся во включении в аэродинамическую схему загрузочного узла эффект Коанда, обеспечивающего отклонение струи воздушного потока.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В БУНКЕРАХ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ ЗАГРУЗКЕ

Процесс заполнения бункера порошкообразным материалом в значительной степени определяется поведением отдельных частиц. В данном случае траектория движения зависит от их крупности, и аэродинамического поля скоростей воздуха в полости бункера, а также начальных условий выпуска двухкомпонентной смеси «твердая частица - воздух» из загрузочных патрубков пневмотранспортной системы.

Характерными особенностями выпуска этой смеси являются значительная скорость компонентов (15-25 м/с) и струйный характер течения несущей среды - воздуха. Учитывая значительные габариты цементных силосов (до 8-15 м в диаметре), это течение будем отождествлять со свободными струями.

2.1. Основные уравнения динамики частиц

2.1.1. Силы, действующие на частицу

При определении траекторий движения частиц учтено действие двух внешних сил: аэродинамические силы и силы тяжести:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{P} + \vec{A}, \quad (2.1)$$

где \vec{v} - вектор скорости частиц (м/с), $m = \frac{\pi d_{\text{э}}^3}{6} \rho_{\text{ч}}$ - масса частицы (кг),

$d_{\text{э}}$ - эквивалентный диаметр частицы (м), $\rho_{\text{ч}}$ - плотность частицы (кг/м³).

Сила тяжести определяется вектором:

$$\vec{P} = m \vec{g}, \quad (2.2)$$

где \vec{g} - вектор ускорения силы тяжести (м²/с), в расчетах принято $g = 9.81 \text{ м}^2/\text{с}$.

Аэродинамическая сила зависит от формы и размеров частицы и является функцией относительной скорости несущей среды:

$$\vec{A} = \psi F_{\text{м}} \frac{|\vec{u} - \vec{v}|(\vec{u} - \vec{v})}{2} \rho, \quad (2.3)$$

где \vec{u} - вектор скорости несущей среды (воздуха) (м/с), ρ - плотность воздуха

(кг/м³), $F_M = \frac{\pi d_p^2}{4}$ - площадь миделева сечения частицы (м²), ψ - коэффициент лобового сопротивления частицы, зависящий от её геометрической частицы и числа Рейнольдса.

Для частиц, полученных в результате дробления (так называемые «острозернистые» частицы) широкое распространение (например, при расчете аспирационных систем) получила двучленная формула озееновского типа [2]:

$$\psi = \frac{24}{Re} + \psi_0, \quad (2.4)$$

где ψ_0 - коэффициент лобового сопротивления в области автомодельности ($\psi_0 = 1,8$ для острозернистых частиц, $\psi_0 = 1 \div 1,5$ - для округлых частиц), Re - число Рейнольдса, в данном случае равное

$$Re = \frac{|\vec{u} - \vec{v}| \rho d_p}{\mu}, \quad (2.5)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости воздуха (Па·с).

Для тонких частиц цемента ($d_p < 15$ мкм) и $Re \leq 1$, коэффициент лобового сопротивления

$$\psi = \frac{24}{Re}, \quad (2.6)$$

и аэродинамическая сила линейно зависит от относительной скорости:

$$\vec{A} = 3\pi\mu d_p (\vec{u} - \vec{v}), \quad (2.7)$$

т.е. определяется формулой Стокса, которая упрощает интегрирование уравнений динамики. Например, в неподвижном воздухе ($\vec{u} = 0$), уравнение (2.1) можно представить в виде:

$$\int_{\vec{v}_0}^{\vec{v}} \frac{d\vec{v}}{\vec{g} - k\vec{v}} = \int_0^t \frac{dt}{m}, \quad (2.8)$$

откуда найдем соотношение для изменения вектора скорости падения частицы во времени t (сек.):

$$\vec{v} = \vec{v}_0 e^{-kt} + \frac{\vec{g}}{k}(1 - e^{-kt}), \quad (2.9)$$

где

$$k = \frac{3\pi\mu d_\vartheta}{m}, \quad (2.10)$$

\vec{v}_0 - вектор скорости частицы в начальный момент времени.

2.1.2. Уравнения динамики

В общем случае для определения траектории частиц перенесем векторное равенство на координатные оси выбранной системы координат. Для этого мы будем использовать цилиндрические оси координат x, y, φ , причем полярные координаты точек: y, φ лежат в горизонтальной плоскости, перпендикулярно направленной вниз вертикальной оси $0x$ (рисунок 2.1).

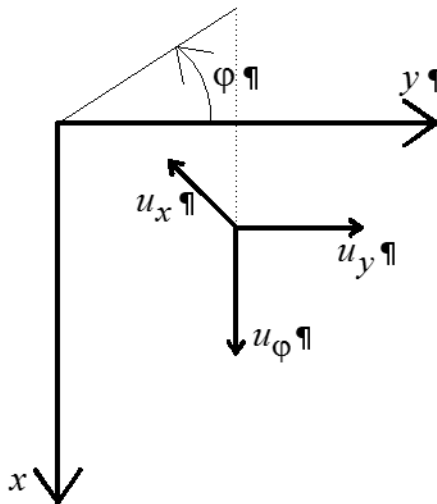


Рисунок 2.1. Координатные оси

В этом случае проекция векторного уравнения (2.1) для тонких частиц примет вид:

$$m \frac{dv_y}{dt} = 3\pi\mu d_\vartheta (u_y - v_y), \quad (2.11)$$

$$m \frac{dv_\varphi}{dt} = 3\pi\mu d_\vartheta (u_\varphi - v_\varphi), \quad (2.12)$$

$$m \frac{dv_x}{dt} = mg + 3\pi\mu d_\vartheta (u_x - v_x), \quad (2.13)$$

или, учитывая стационарный характер падения частиц:

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} - y\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2, \quad (2.14)$$

$$\frac{dv_\varphi}{dt} = y\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\frac{dy}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2.15)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (2.16)$$

$$v_y = \frac{dy}{dt}, \quad (2.17)$$

$$v_\varphi = y\frac{d\varphi}{dt}, \quad (2.18)$$

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad (2.19)$$

имеем следующую систему трех дифференциальных уравнений второго порядка:

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = m y \frac{d\varphi}{dt} + 3\pi\mu d_\vartheta \left(u_y - \frac{dy}{dt} \right), \quad (2.20)$$

$$m y \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -2m \frac{dy}{dt} + 3\pi\mu d_\vartheta \left(u_\varphi - y \frac{d\varphi}{dt} \right), \quad (2.21)$$

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = mg + 3\pi\mu d_\vartheta \left(u_x - \frac{dx}{dt} \right). \quad (2.22)$$

Здесь v_y , v_φ и v_x - проекции вектора скорости частицы, соответственно на ось Oy (радиальная составляющая скорости), на перпендикуляр к оси Oy (окружная скорость) и на вертикальную ось Ox (скорость вертикального перемещения частицы); u_y , u_φ и u_x - соответствующие проекции вектора скорости воздуха. В правой части системы уравнений (2.20) - (2.22) первые члены представляют собой центробежную, кориолисову силы и силу тяжести.

Из-за нелинейности система уравнений (2.20) - (2.22) чаще всего неразрешима в квадратурах, её исследование возможно лишь численными методами. Для сокращения числа переменных чаще всего используется безразмерная форма уравнений динамики, причем, как правило интегрируется

система дифференциальных уравнений первого порядка. В нашем случае (при цилиндрической системе координат и стационарной динамике воздуха и её частицы) систему уравнений второго порядка (2.20) - (2.22) можно представить в виде:

$$\frac{dx}{dt} = v_x, \quad (2.23)$$

$$\frac{dy}{dt} = v_y, \quad (2.24)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{v_\varphi}{y} = \omega_\varphi, \quad (2.25)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = g + k(u_x - v_x), \quad (2.26)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = y\omega_\varphi^2 + k(u_y - v_y), \quad (2.27)$$

$$\frac{d\omega_\varphi}{dt} = -2u_y \frac{w_\varphi}{y} + \frac{k}{y}(u_\varphi - y\omega_\varphi), \quad (2.28)$$

где ω_φ - угловая составляющая скорости частицы, рад/с.

Иногда используется каноническая форма записи системы уравнений динамики:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, t). \quad (2.29)$$

Запишем в канонической форме систему уравнений (2.23) – (2.28) в безразмерных величинах, для этого, применяя произвольную систему базовых параметров: характерную длину – l_∞ , скорость – u_∞ , время – $\tau_\infty = l_\infty / u_\infty$, введем следующую систему безразмерных величин:

$$x_1 = \frac{x}{l_\infty}; \quad x_2 = \frac{y}{l_\infty}; \quad x_3 = \varphi, \quad (2.30)$$

$$x_4 = \frac{v_x}{u_\infty}; \quad x_5 = \frac{v_y}{u_\infty}; \quad x_6 = \frac{d\varphi}{dt} \tau_\infty; \quad \tau = \frac{t}{l_\infty} u_\infty. \quad (2.31)$$

Тогда получим:

$$\dot{x}_1 = x_4; \quad \dot{x}_2 = x_5; \quad \dot{x}_3 = x_6, \quad (2.32)$$

$$\dot{x}_4 = Fr + \frac{1}{St} \left(\frac{u_x}{u_\infty} - x_4 \right), \quad (2.33)$$

$$\dot{x}_5 = x_2 x_6^2 + \frac{1}{St} \left(\frac{u_y}{u_\infty} - x_5 \right), \quad (2.34)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{x_2} \left(-2 x_2 x_6 + \frac{1}{St} \left(\frac{u_\varphi}{u_\infty} - x_2 x_6 \right) \right). \quad (2.35)$$

Здесь точка над величинами обозначает производную по безразмерной величине τ_∞ ; Fr – число Фруда, учитывающее действие сил тяжести:

$$Fr = \frac{g l_\infty}{u_\infty^2}, \quad (2.36)$$

St – число Стокса, учитывающее действие аэродинамических сил:

$$St = \frac{u_\infty}{k l_\infty} = \frac{d_0^2 \rho_\mu u_\infty}{18 \mu l_\infty}, \quad (2.37)$$

$\frac{u_x}{u_\infty}$, $\frac{u_y}{u_\infty}$, $\frac{u_\varphi}{u_\infty}$ – безразмерные составляющие струйного течения, которые должны

быть заданы функциями безразмерных координат x_1 , x_2 , x_3 .

2.1.3. Определение начальных условий

При формулировании начальных условий параметров для описания поля скоростей струйных течений воздуха, как правило, в качестве характерной длины принимается размер выпускного отверстия (для круглого – диаметр, для щелевидного отверстия, в случае плоской и веерной струи – высота щели b_0) [139], а в качестве характерной скорости – средняя по расходу скорость воздуха в выпускном отверстии (u_0). Естественно, в этом случае, характерным временем является:

$$\tau_\infty = \frac{d_0}{u_0}; \quad \text{или} \quad \tau_\infty = \frac{b_0}{u_0}. \quad (2.38)$$

Для анализа траекторий частиц во всем бункере (с целью выбора

рациональной схемы укладки складываемого материала) целесообразно в качестве характерной длины принимать либо диаметр бункера D (м) или его глубину $H_б$ (м). В этом случае в качестве характерного времени будет выступать:

$$\tau_{\infty} = \frac{D}{u_0}; \text{ или } \tau_{\infty} = \frac{H}{u_0}, \quad (2.39)$$

имеющий некоторый физический смысл, а именно, в последнем случае, указывает на порядок времени падения частиц на всю глубину бункера.

В качестве начальных условий (при $\tau = \frac{t}{\tau_{\infty}} = 0$) будем принимать:

для начальных точек траекторий:

$$x_1(0) = \frac{x}{l_{\infty}} = 0, \quad (2.40)$$

$$x_2(0) = \frac{y_0}{l_{\infty}} = a \neq 0, \quad (2.41)$$

например, $0 < y \leq d_0 / 2$ для круглого патрубка;

$$x_3(0) = \varphi = 0, \quad (2.42)$$

для конечных точек траекторий (максимальные значения):

$$x_1(\tau_k) = \frac{H}{l_{\infty}}; \text{ или } x_1(\tau_k) = \frac{D}{2 \cdot l_{\infty}}, \quad (2.43)$$

$$x_2(\tau_k) \leq \frac{D}{2 \cdot l_{\infty}}, \quad (2.44)$$

для составляющих начальных скоростей частиц:

$$x_4(0) = \frac{v_x(0)}{u_0} \geq 1; \quad (2.45)$$

$$x_5(0) = \frac{v_y(0)}{u_0} = 0; \quad (2.46)$$

$$x_2(0) \cdot x_6(0) \geq \frac{u_{\varphi}}{u_0}. \quad (2.47)$$

Эти условия будут корректироваться с учетом характера поля скоростей и

схемы загрузки бункера.

2.2. Поле скоростей воздуха при различном конструктивном исполнении загрузочных патрубков

Несмотря на широкий круг работ по струйным течениям [149-156], в большинстве из них главное внимание уделяется структуре и интегральным параметрам струй. Что касается поля скоростей, то подавляющее количество работ посвящены изучению изменения продольной составляющей скорости [149-153, 156]. Нас же интересуют все составляющие вектора скорости в струе, в том числе и величина «малой» поперечной составляющей. Несмотря на ее малость, допускаемой в теории струй как характерный случай пограничного слоя, она может оказывать заметное отклонение частиц в горизонтальном отклонении. Особенно когда из внешних сил, действующих на частицы, остается лишь аэродинамическая сила.

Потому для определения поля скоростей мы основывались на классических решениях автомодельных движений в турбулентных струях, используя которые имеется возможность определить поля скоростей в достаточно больших областях движения частиц.

2.2.1. Осесимметричная свободная струя

Используя классические построения уравнений пограничного слоя из уравнений Навье-Стокса [151], рассмотрим динамику свободных струйных течений в полости бункеров силосного типа для складирования порошкообразных сыпучих материалов. Исходные уравнения пограничного слоя в слабозакрученных воздушных изотермических струях запишем в цилиндрической системе координат x, y, φ (рисунок 2.2):

$$\frac{\partial}{\partial x}(yu_x) + \frac{\partial}{\partial y}(yu_y) = 0. \quad (2.48)$$

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\nu_T}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right); \quad \frac{\rho \omega_\varphi^2}{y} = \frac{\partial P}{\partial y}; \quad (2.49)$$

$$u_x \frac{\partial u_\varphi}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_\varphi}{\partial y} + \frac{u_\varphi \omega_\varphi}{y} = v_T \left\{ \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \frac{\partial u_\varphi}{\partial y} \right) - \frac{u_\varphi}{y^2} \right\}; \quad (2.50)$$

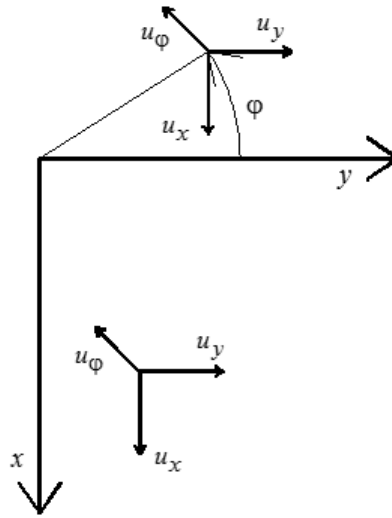


Рисунок 2.2. Оси координат для расчета осесимметричной свободной струи

Граничные условия:

$$u_y(x, 0) = 0; \quad u_\varphi(x, 0) = 0; \quad \left. \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad (2.51)$$

$$u_x(x, \infty) = 0; \quad u_\varphi(x, \infty) = 0; \quad P(x, \infty) = P_\infty. \quad (2.52)$$

Для осуществления перевода исходной системы уравнений в частных производных (уравнений (2.48)-(2.50)) к системе дифференциальных уравнений в обычных производных введены следующие формулы преобразования (штрих над функцией означает производные по независимой переменной $\eta = Bux^\beta$):

$$\frac{u_x}{u_{xm}} = \frac{F'(\eta)}{\eta}; \quad \frac{u_\varphi}{u_{\varphi m}} = \Phi(\eta); \quad \frac{P - P_\infty}{P_m - P_\infty} = P(\eta); \quad (2.53)$$

$$u_{xm} = Ax^\alpha; \quad u_{\varphi m} = Cx^\varepsilon; \quad P_m - P_\infty = \rho D x^\delta; \quad (2.54)$$

$$\eta = Bux^\beta; \quad \left(y = \frac{\eta}{Bx^\beta}; \quad \frac{\partial \eta}{\partial x} = \beta Bux^{\beta-1}; \quad \frac{\partial \eta}{\partial y} = Bx^\beta \right), \quad (2.55)$$

где u_{xm} и $u_{\varphi m}$ - продольная и окружная составляющие скорости на оси струи, м/с;

P_m - избыточное давление на оси струи, Па; ρ - плотность воздуха, кг/м³,

$\alpha, \beta, \varepsilon, \delta, A, B, C, D$ - константы автомодельности.

Для того чтобы преобразовать систему (2.48)-(2.50), найдем все члены этих уравнений, как функции новой независимой переменной:

$$u_x = Ax^\alpha \frac{F'}{\eta}; \quad \frac{\partial u_x}{\partial x} = Ax^{\alpha-1} \left[\alpha \frac{F'}{\eta} + \beta \eta \left(\frac{F'}{\eta} \right)' \right]; \quad \frac{\partial u_x}{\partial y} = ABx^{\alpha+\beta} \left(\frac{F'}{\eta} \right)';$$

Из уравнения (2.50):

$$u_y = -\frac{1}{y} \int_0^y \frac{\partial}{\partial x} (yu_x) dy = -\frac{A}{B} x^{\alpha-\beta-1} \left[(\alpha-2\beta) \frac{F}{\eta} + \beta F' \right]; \quad u_\varphi = C x^\varepsilon \Phi(\eta);$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial x} = C x^{\varepsilon-1} [\varepsilon \Phi + \beta \eta \Phi']; \quad \frac{\partial u_\varphi}{\partial y} = C B^2 x^{\varepsilon+2\beta} \cdot \frac{1}{\eta} (\eta \Phi)'$$

Константы автомодельности:

$$\alpha = -1; \quad \beta = -1; \quad \varepsilon = -2; \quad \delta = -4; \quad k = c^2; \quad (2.56)$$

$$A = \sqrt{\frac{3I_x}{8\pi r a^2}}; \quad B = \frac{1}{a} \approx \frac{1}{\sqrt{k}}; \quad C = \frac{3M_x}{32\pi r a^2} \sqrt{\frac{8\pi r}{3I_x}}; \quad D = \frac{M_x^2}{32\pi r a^4 I_x}, \quad (2.57)$$

$$I_x = 2\pi \int_0^\infty \rho u_x^2 y dy = const, \quad (2.58)$$

$$M_x = 2\pi \int_0^\infty \rho u_x u_\varphi y^2 dy = const. \quad (2.59)$$

Уравнения автомодельного движения:

$$F'' - \frac{F'}{\eta} + \left(\frac{FF'}{\eta} \right)' = 0; \quad P' = \frac{\Phi^2}{\eta}; \quad \Phi'' + \frac{1+F}{\eta} \Phi' + \frac{\eta F' + F - 1}{\eta^2} \Phi = 0, \quad (2.60)$$

$$\left. \frac{F'}{\eta} \right|_{\eta=0} = 1; \quad \left. \frac{F}{\eta} \right|_{\eta=0} = 0; \quad \Phi(0) = 0; \quad \left. \frac{F'}{\eta} \right|_{\eta=\infty} = 0; \quad \Phi(\infty) = 0; \quad P(\infty) = 0. \quad (2.61)$$

$$\varphi_{1/2} = 1.82$$

Решение этой системы автомодельных уравнений имеет вид:

$$F(\eta) = \frac{0,5\eta^2}{1+0,125\eta^2}; \quad F'(\eta) = \frac{\eta}{(1+0,125\eta^2)^2}; \quad (2.62)$$

$$\Phi(\eta) = \frac{\eta}{(1 + 0,125\eta^2)^2}; \quad (2.63)$$

$$P(\eta) = \frac{1}{(1 + 0,125\eta^2)^3}. \quad (2.64)$$

Используя эти соотношения найдем расчетные формулы для составляющих вектора скорости воздуха в осесимметричной слабозакрученной струе:

Для продольной составляющей в силу (2.53) и (2.54) имеем:

$$u = Ax^{-1} \frac{F'(\eta)}{\eta}, \quad (2.65)$$

или, определив начальный импульс,

$$I_x = 2\pi r_{x0}^2 \frac{r_0^2}{2} = \pi r_0^2 \rho u_{x0}^2 = \frac{\pi d_0^2}{4} \rho u_{x0}^2, \quad (2.66)$$

и параметр

$$A = \sqrt{\frac{3\pi d_0^2 \rho u_{x0}^2}{8 \cdot 4\pi a^2}} = \sqrt{\frac{3}{32}} \frac{d_0 u_{x0}}{a}, \quad (2.67)$$

получим соотношение для определения продольной скорости (с учетом второго уравнения (2.62)):

$$\frac{u_x}{u_{x0}} = K_{u_x} \frac{F'(\eta)}{\bar{x}\eta}, \quad K_{u_x} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{3}{32}}, \quad \eta = \frac{\bar{y}}{a\bar{x}}, \quad (2.68)$$

где d_0 – диаметр патрубка (начального сечения струи), м; u_{x0} – скорость воздуха на выходе из патрубка, м/с; $\bar{x} = x/d_0$; $\bar{y} = y/d_0$ – безразмерные координаты; a – экспериментальный коэффициент, учитывающий «турбулентную» структуру струи [149, 15] (принимаемый при расчете $a = 0,05$).

Чтобы найти продольную составляющую проинтегрируем уравнение неразрывности (2.50):

$$u_y = -\frac{1}{y} \int_0^y \frac{\partial u_x}{\partial x} dy. \quad (2.69)$$

Или, имея в виду формулы преобразования (2.53)-(2.55), запишем:

$$\frac{\partial u_{xy}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Ay}{x} \frac{F'(\eta)}{\eta} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{B} F'(\eta) \right) = \frac{A}{B} F''(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x};$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = By\beta x^{\beta-1} = \eta \frac{\beta}{x};$$

$$y = \frac{\eta}{Bx^\beta}; \quad dy = \frac{d\eta}{Bx^\beta}.$$

Подставляя полученные преобразования в (2.69), имеем:

$$u_y = -\frac{1}{y} \int \frac{A}{B} F'' \eta \frac{\beta}{x} \frac{d\eta}{Bx^\beta} = \frac{A}{yB^2} \int F'' \eta d\eta. \quad (2.70)$$

Исходя из последнего уравнения и в силу (2.50), получим следующее уравнение:

$$F'' = \left(\frac{\eta}{(1+0,125\eta^2)^2} \right)' = \frac{(1+0,125\eta^2)^2 - \eta(2(1+0,125\eta^2) \cdot 0,5\eta)}{[(1+0,125\eta^2)^2]^2} =$$

$$= \frac{1+0,125\eta^2 - \eta^2}{(1+0,125\eta^2)^3} = \frac{1-0,875\eta^2}{(1+0,125\eta^2)^3}.$$

Интегрируя которое, найдем:

$$f(\eta) = \int_0^\eta \frac{1-0,875\eta^2 \cdot \eta d\eta}{(1+0,125\eta^2)^3} = \left. \begin{cases} 1+0,125\eta^2 = z; \\ \eta^2 = \frac{z-1}{0,125} : 8(z-1). \end{cases} \right\} = 4 \int_1^z \frac{1-0,875 \cdot 8(z-1)}{z^3} dz =$$

$$= 4 \int_1^z \frac{8-7z}{z^3} dz = 4 \int_1^z (8z^{-3} - 7z^{-2}) dz = 2 \left[\frac{7}{z} - \frac{1}{z^2} - 3 \right].$$

Таким образом расчетное соотношение (2.70) для скорости воздуха в струе с учетом (2.57) и (2.67):

$$u_y = \sqrt{\frac{3}{32}} \frac{d_0 u_{x0}}{a \frac{1}{a^2} y} \left[\frac{7}{z} - \frac{1}{z^2} - 3 \right], \quad (2.71)$$

где $z = 1 + \frac{1}{8}\eta^2$; $\eta = \frac{\bar{y}}{a\bar{x}}$; $\bar{x} = \frac{x}{d_0}$; $\bar{y} = \frac{y}{a}$;

или

$$\frac{u_y}{u_{x0}} = K_y \frac{1}{\bar{y}} \left(\frac{7}{z} - \frac{1}{z^2} - 3 \right); \quad (2.72)$$

где

$$K_y = \frac{2a}{3} \sqrt{\frac{3}{32}}. \quad (2.73)$$

Для окружной скорости в силу (2.53) и (2.54), имеем

$$u_\varphi = C \frac{\Phi(\eta)}{x^2}$$

или определив поток момента количества движения относительно оси ОХ:

$$M_x = 2\pi r u_{x0} u_{\varphi 0} \frac{r_0^2}{3} = 2\pi r u_{x0} u_{\varphi 0} \frac{d_0^3}{24} \quad (2.74)$$

и параметр

$$C = \frac{3 \cdot 2\pi r u_{x0} u_{\varphi 0} d_0^3}{32\pi r a^2 \cdot 24} \sqrt{\frac{8\pi r}{3 \frac{\pi}{4} d_0^2 r u_{x0}^2}} = u_0 d_0^2 K_\varphi, \quad (2.75)$$

где

$$K_\varphi = \frac{1}{24a^2} \sqrt{\frac{3}{32}} \quad (2.76)$$

найдем окружную скорость струи (с учетом (2.63)):

$$\frac{u_\varphi}{u_0} = K_\varphi \frac{\Phi(\eta)}{(\bar{x})^2}. \quad (2.77)$$

2.2.2. Плоская струя

Исходные уравнения пограничного слоя плоских струй запишем в цилиндрической системе координат x, y, φ (рисунок 2.3):

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial u_x}{\partial y} \right); \quad \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0, \quad (2.78)$$

где ν_T - коэффициент турбулентного обмена:

$$\nu_T = K \cdot Ax^{\alpha-\beta} \approx x^{0,5}. \quad (2.79)$$

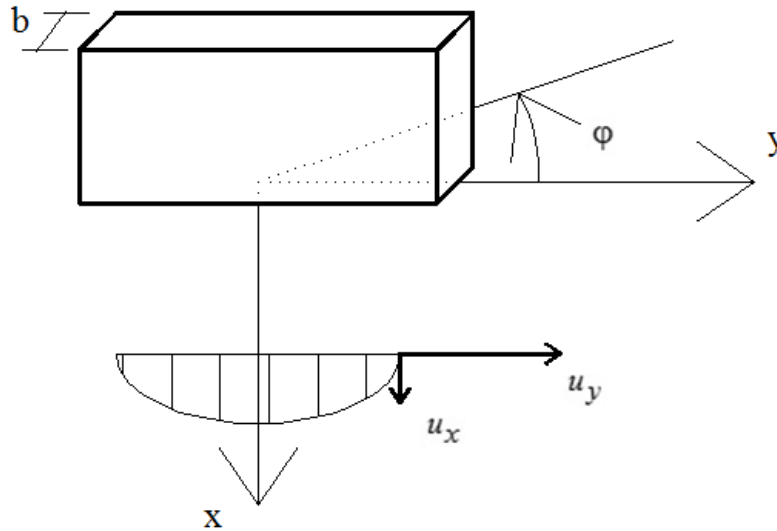


Рисунок 2.3. Оси координат для расчета плоской струи

Граничные условия:

$$u_y(x, 0) = 0; \quad \left. \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad u_x(x, \pm\infty) = 0. \quad (2.80)$$

Поскольку в условиях плоской струи на оси симметрии ($y=0$) $u_m = u_x$, т.е. формулы преобразования имеют вид:

$$\frac{u_x}{u_m} = F'(\eta), \quad u_m = Ax^\alpha, \quad \eta = Bux^\beta, \quad B = \frac{1}{a}; \quad (2.81)$$

Константы автомодельности

$$\alpha = -\frac{1}{2}; \quad \beta = -1; \quad (2.82)$$

$$A = \sqrt{\frac{3I_x}{8\rho\sqrt{K}}}; \quad B = \frac{1}{2\sqrt{K}} = \frac{1}{a}; \quad K = \frac{a^2}{4}, \quad (2.83)$$

где a – коэффициент «турбулентной структуры» плоской струи (в расчетах для условий пневмотранспортной загрузки $a = 0,16$) [3] [4],

$$I_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho u_x^2 dy = const = \rho u_{x0}^2 b_0, \quad (2.84)$$

где b_0 – ширина щели патрубке, м; u_0 – скорость воздуха в патрубке, м/с.

Уравнение автомодельного движения для случая плоской струи:

$$F''' + 2(FF')' = 0, \quad (2.85)$$

$$F(0) = 0, \quad F'(0) = 1, \quad F'(\pm\infty) = 0, \quad (2.86)$$

$$\eta_{1/2} = 0,88. \quad (2.87)$$

Решение

$$F = th\eta; \quad F' = 1 - th^2\eta; \quad \text{или} \quad F' = 1 - F^2. \quad (2.88)$$

Поле скоростей

$$u_x = Ax^{-\frac{1}{2}}F' = Ax^{-\frac{1}{2}}(1 - F^2) = Ax^{-\frac{1}{2}}(1 - th^2\eta); \quad (2.89)$$

$$u_y = \frac{A}{B\sqrt{x}}th\eta\left(\frac{1}{2} - th\eta\right). \quad (2.90)$$

Здесь u_y найдена из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0; \quad u_y = -\int_0^y \frac{\partial u_x}{\partial x} dy.$$

Т.к.

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = A \frac{\partial}{\partial x} (x^{-1/2} F') = A \left\{ \left(-\frac{1}{2} x^{-3/2} \right) F' + x^{-1/2} F'' \frac{\partial \eta}{\partial x} \right\},$$

а

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = B y \beta x^{\beta-1} = -1B \frac{y}{x} x^{-1} = -\eta x^{-1}; \quad y = \frac{\eta}{Bx^{-1}} = \frac{x}{B} \eta; \quad dy = \frac{x}{B} d\eta,$$

имеем

$$\begin{aligned} u_x &= -\int_0^{\eta} A \left\{ \left(-\frac{1}{2} x^{-3/2} \right) F' - x^{-3/2} F'' \right\} \frac{x}{B} d\eta = \int_0^{\eta} x^{-1/2} A \left(\frac{1}{2} F' + F'' \right) \frac{1}{B} d\eta = \\ &= x^{-1/2} \frac{A}{B} \int_0^{\eta} \left(\frac{1}{2} F' + F'' \right) d\eta = \frac{A}{B\sqrt{x}} \int_1^{\frac{1}{2}F+F'} d\left(\frac{1}{2} F' + F' \right) = \\ &= \frac{A}{B\sqrt{x}} \left[\frac{1}{2} F' + F' - 1 \right] = \frac{A}{B\sqrt{x}} \left[\frac{1}{2} th\eta + 1 - th^2\eta - 1 \right] = \frac{A}{B\sqrt{x}} th\eta \left[\frac{1}{2} - th\eta \right]. \end{aligned}$$

Расчетные формулы для поля скоростей в струе примут вид:

$$\bar{u}_x = K_{u_x} \frac{1 - th^2 \eta}{\sqrt{\bar{x}}}; \quad \bar{u}_y = K_{u_y} th \eta \left(\frac{1}{2} - th \eta \right); \quad \eta = \frac{\bar{y}}{a\bar{x}}, \quad (2.91)$$

где

$$\bar{u}_x = u_x / u_{x0}; \quad \bar{u}_y = u_y / u_{x0}, \quad (2.92)$$

$$\bar{x} = x / b_0; \quad \bar{y} = y / b_0; \quad (2.93)$$

$$K_{u_x} = \sqrt{\frac{3}{4a}}; \quad K_{u_y} = \sqrt{\frac{3a}{4}} = aK_{u_x}. \quad (2.94)$$

2.2.3. Вверная слабозакрученная струя

Течение, создаваемое вверной струей воздуха (в системе координат x, y, φ см. рисунок 2.4), истекающего во все стороны из линейного элемента малой длины Δu_0 в начале координат, симметрично, как и плоская струя относительно плоскости $y = 0$ и обладает осевой симметрией относительно оси Ox как и круглая струя.

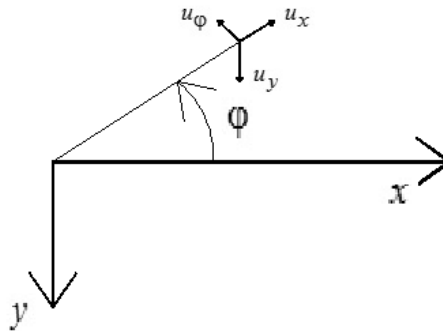


Рисунок 2.4. Оси координат для расчета вверной струи

Уравнения движения и неразрывности в приближении теории пограничного слоя, для изотермического случая, запишем в виде [151]:

$$\left. \begin{aligned} u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + v \frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{u_\varphi^2}{x} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \\ u_x \frac{\partial u_\varphi}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_\varphi}{\partial y} + \frac{u_x u_\varphi}{x} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x} (x u_x) + \frac{\partial}{\partial y} (x u_y) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.95)$$

где u_x, u_y, u_φ – продольная (вдоль оси Ox), вертикальная (вдоль оси Oy) и

окружная (по перпендикуляру к оси $0x$ в плоскости $y = const$) составляющие скорости воздуха в струе.

Граничные условия для системы (2.95) имеют вид:

$$\left. \begin{array}{l} u_y = 0, \quad \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial u_\varphi}{\partial y} = 0 \quad \text{при } y = 0 \\ u_x = u_\varphi = 0 \quad \quad \quad \text{при } y = \pm\infty \end{array} \right\}. \quad (2.96)$$

С целью получения однозначного решения задачи граничные условия дополним интегральными условиями.

Умножим первое уравнение системы (2.95) на x , а третье – на u_x , суммируем левые и правые части уравнений; после очевидных преобразований получим:

$$\frac{\partial}{\partial x}(xu_x^2) + \frac{\partial}{\partial y}(xu_x u_y) - u_\varphi^2 = \nu_T \frac{\partial^2}{\partial y^2}(xu_x),$$

интегрируя которое по y в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ с учетом граничных условий (2.96) имеем следующее интегральное уравнение:

$$\frac{d}{dx} \int_{-\infty}^{+\infty} xu_x^2 dy = \int_{-\infty}^{+\infty} u_\varphi^2 dy.$$

Или в случае незакрученной струи ($u_\varphi = 0$), импульс струи, сохраняет постоянное значение вдоль струи (по оси $0x$):

$$I_x = 2\pi x \int_{-\infty}^{+\infty} \rho u_x^2 dy = const. \quad (2.97)$$

Для слабозакрученных струй на значительном удалении от начала координат это соотношение сохраняет свое значение в качестве предельного. Справедливость этого допущения в работе [151] аргументируется разными законами изменения продольной u и окружной w скоростей удаления от начала координат:

$$u_x \sim \frac{1}{x}, \quad u_\varphi \sim \frac{1}{x^2}. \quad (2.98)$$

поэтому в первом уравнении системы (2.95) член $\frac{u_\Phi^2}{x} \sim \frac{1}{x^5}$, тогда как остальные члены будут пропорциональны $\frac{1}{x^3}$.

Для получения второго уравнения (для закрученной веерной струи) умножим второе уравнение системы (2.95) на x^2 и сложим его с уравнением неразрывности, предварительно умноженным на xu_Φ . После несложного преобразования (группировка частных производных величин в частные производные произведений) получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial x}(x^2 u_x u_\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(x^2 u_y u_\Phi) = v_T \frac{\partial^2}{\partial y^2}(x^2 u_\Phi),$$

интегрируя которое поперек струи, в пределах от $y = +\infty$, с учетом тех же граничных условий (2.96) найдем:

$$M_y = 2\pi x^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \rho u_x u_\Phi dy = const. \quad (2.99)$$

Это интегральное соотношение выражает закон сохранения в закрученной веерной струе потока момента количества движения относительно оси Oy .

Для определения поля скоростей воспользуемся методом аффинных преобразований системы координат, широко используемый не только в теории однородных струйных течений [149, 153] (как ламинарных, так и турбулентных), но и при оценке эффекта эжекции в струе падающих частиц [31].

Введем функции $F(\eta)$ и $\Phi(\eta)$, где η - независимая переменная при $B = \frac{1}{a}$; $\beta = -1$, и полагая что максимальные значения скоростей на оси Ox соответственно равны:

$$u_{xm} = Ax^\alpha; \quad u_{\Phi m} = Cx^\varepsilon. \quad (2.100)$$

Обозначим:

$$u_x = u_{xm} F_\eta'; \quad u_\varphi = u_{\varphi m} \Phi(\eta); \quad \eta = y B x^\beta. \quad (2.101)$$

Преобразуем все члены уравнений с помощью новой независимой переменной η (u_{xm} – значение скорости на оси струи $0x$; $u_{\varphi m}$ – максимальное значение окружной скорости; штрих и нижний индекс η здесь и далее означает обычное дифференцирование по новой независимой переменной):

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = F_\eta' \frac{\partial u_{xm}}{\partial x} + u_{xm} \frac{dF_\eta'}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = A x^{\alpha-1} (\alpha F_\eta' + \beta \eta F_\eta''); \quad (2.102)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = u_{xm} F_\eta'' \frac{\partial \eta}{\partial y} = A \cdot B x^{\alpha+\beta} F_\eta''; \quad (2.103)$$

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = A \cdot B x^{\alpha+\beta} F_\eta''' \frac{\partial \eta}{\partial y} = A \cdot B^2 x^{\alpha+2\beta} F_\eta'''; \quad (2.104)$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial x} = \Phi \frac{\partial u_{\varphi m}}{\partial x} + u_{\varphi m} \Phi_\eta' \frac{\partial \eta}{\partial x} = \Phi \left(\varepsilon x^{\varepsilon-1} + C x^\varepsilon \Phi_\eta' \frac{\beta}{x} \eta \right) = C x^{\varepsilon-1} (\varepsilon \Phi + \beta \eta \Phi_\eta'); \quad (2.105)$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial y} = u_{\varphi m} \Phi_\eta' \frac{\partial \eta}{\partial y} = B \cdot C x^{\beta+\varepsilon} \Phi_\eta'; \quad (2.106)$$

$$\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial y^2} = B^2 C x^{2\beta+\varepsilon} \Phi_\eta''. \quad (2.107)$$

Для завершения перевода системы (2.95) к новой переменной выразим вертикальную составляющую u_φ вектора скорости вверной струи. Воспользуемся уравнением неразрывности (третьим уравнением системы (2.95)):

или с учетом (2.101)-(2.102) и имея ввиду, что

$$y = \frac{\eta}{B x^\beta}; \quad dy = \frac{d\eta}{B x^\beta}; \quad (2.108)$$

получим:

$$u_y = -\frac{A}{B} x^{\alpha-\beta-1} \cdot \int_0^\eta \left[(1+\alpha) F_\eta' + \beta \eta F_\eta'' \right] d\eta = -\frac{A}{B} x^{\alpha-\beta-1} \left[(1+\alpha-\beta) F + \beta \eta F_\eta' \right]. \quad (2.109)$$

Подставляя полученные результаты в первое уравнение исходной системы (2.95), после очевидных упрощений получим:

$$\alpha(F'_\eta)^2 - (1 + \alpha - \beta)F''_\eta \cdot F = v_T \frac{B^2}{A} x^{2\beta - \alpha + 1} F'''_\eta. \quad (2.110)$$

С учетом требования об отсутствии в автомодельном уравнении явной функции прежних независимых переменных (в данном случае x), с учетом:

$$\beta = \frac{\alpha - 1}{2} \quad (2.111)$$

запишем уравнение (2.110) в виде:

$$v_T \frac{B^2}{A} F''' = \alpha(F')^2 - \frac{3 + \alpha}{2} FF''. \quad (2.112)$$

С учетом соотношений (2.101), (2.105) и (2.109) получим для второй неизвестной функции Φ следующее дифференциальное уравнение:

$$v_T \frac{B^2}{A} \Phi'' = (1 + \varepsilon)F'\Phi - \frac{3 + \alpha}{2} F\Phi'. \quad (2.113)$$

Для определения констант α , β и ε воспользуемся интегральными условиями (2.97), (2.99), которые с учетом (2.101) запишем в виде:

$$I_x = 2\pi x \int_{-\infty}^{+\infty} \rho \cdot A^2 x^{2\alpha} (F'_\eta)^2 \frac{d\eta}{Bx^\beta} = 2\pi x^{2\alpha - \beta + 1} \rho \frac{A^2}{B} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(F'_\eta)^2}{2} d\eta; \quad (2.114)$$

$$2\alpha - \beta + 1 = 0, \quad \beta = 2\alpha + 1; \quad (2.115)$$

$$\frac{A^2}{B} = \frac{I_x}{2\Pi\rho I_1}; \quad I_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} (F')^2 d\eta; \quad (2.116)$$

Аналогично раскрывая условие (2.99), получим:

$$M_y = 2\pi x^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \rho A x^\alpha F'_\eta C x^\varepsilon \Phi \frac{d\eta}{Bx^\beta} = 2\pi\rho \frac{A \cdot C}{B} x^{\alpha + \varepsilon - \beta + 2} \int_{-\infty}^{+\infty} F'_\eta \Phi d\eta, \quad (2.117)$$

откуда запишем

$$\varepsilon = \beta - \alpha - 2; \quad (2.118)$$

$$C = \frac{B}{A} \cdot \frac{M_y}{2\pi r I_2}; \quad I_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} F'_\eta \Phi d\eta. \quad (2.119)$$

Кроме того, пользуясь произвольностью значений постоянных A и B , полагается

$$\frac{A}{B^2} = 2\nu_T. \quad (2.120)$$

Совместное решение уравнений (2.111), (2.115) и (2.118) дает следующее значение констант автомодельности:

$$\alpha = -1; \quad \beta = -1; \quad \varepsilon = -2. \quad (2.121)$$

С учетом (2.119) и (2.110) система дифференциальных уравнений (2.112)-(2.113) намного упрощается (здесь и далее индекс η опущен):

$$F''' + (F')^2 + FF'' = F''' + 2(F \cdot F')' = 0; \quad (2.122)$$

$$\Phi'' + 2(F'\Phi + F\Phi') = \Phi'' + 2(F \cdot \Phi)' = 0, \quad (2.123)$$

а граничные условия (2.96) примут вид:

$$F = 0; \quad F'' = 0 \quad (F' = \text{const} = 1); \quad \Phi' = 0 \quad (\Phi = \text{const} = 1) \quad \text{при } \eta=0; \quad (2.124)$$

с учетом (2.101):

$$F' = 0; \quad \Phi = 0 \quad \text{при } \eta = \pm \infty. \quad (2.125)$$

Решение системы уравнений (2.122)-(2.123) при этих граничных условиях имеет вид:

$$F = th\eta; \quad F' = \frac{1}{ch^2\eta} = 1 - th^2\eta; \quad F' = \Phi. \quad (2.126)$$

Заметим, что в силу последнего равенства имеем:

$$I_1 = I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} (F')^2 d\eta = \frac{4}{3}. \quad (2.127)$$

Для турбулентного течения характер изменения поля скоростей описывается теми же функциями автомодельного течения, отличия лишь в значениях постоянных A , B и C :

$$A = \sqrt{\frac{3I_x}{8\pi\rho\sqrt{2K}}}; \quad B = \frac{1}{\sqrt{2K}} = \frac{1}{a}; \quad C = M_y \sqrt{\frac{3}{8\pi\rho I_x \sqrt{2K}}}, \quad (2.128)$$

где a – экспериментальный коэффициент, связанный с коэффициентом $K = a^2/2$.

Импульс I_x в силу (2.97) для веерной струи, истекающей из кольцевой щели высотой b_0 (м) со скоростью u_0 (м/с), вычисляется по формуле:

$$I_x = 2\pi r_0 \rho u_{x0}^2 b_0, \quad (2.129)$$

где r_0 – радиус кольцевой щели (расстояние от оси Oy до начального сечения струи), м.

A для момента количества движения, в силу (2.99):

$$M_y = 2\pi r_0^2 \rho u_{x0} u_{\varphi 0} b_0, \quad (2.130)$$

где $u_{\varphi 0} = u_{x0}/\operatorname{tg} \gamma$, γ – угол наклона вектора скорости выхода воздуха к касательной и кольцевой щели (при $\gamma = \frac{\pi}{2}$; $u_{\varphi 0} = 0$; $M_y = 0$, т.е. отсутствует закрутка веерной струи, а вектор скорости выхода равен u_{x0} , при $C = 0$).

Таким образом, расчетные формулы для определения поля скоростей в слабо закрученной турбулентной веерной струе имеют вид:

$$u_x = \sqrt{\frac{3}{4}} \frac{r_0 b_0}{ax^2} \frac{u_{x0}}{ch^2 \eta}, \quad \eta = \frac{y}{ax}; \quad (2.131)$$

$$u_y = -\sqrt{\frac{3a}{4}} \frac{r_0 b_0}{x^2} u_{x0} (F - \eta F') = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3a}{4}} \frac{r_0 b_0}{x^2} u_{x0} \frac{2\eta - sh 2\eta}{ch^2 \eta}; \quad (2.132)$$

$$u_{\varphi} = \sqrt{\frac{3}{4a}} \frac{r_0^3 b_0}{x^4} u_{\varphi 0} (1 - th^2 \eta) = \sqrt{\frac{3}{4a}} \frac{r_0^3 b_0}{x^4} \frac{u_{\varphi 0}}{ch^2 \eta}. \quad (2.133)$$

При этом единственно неизвестный коэффициент a определяется по формуле:

$$a = \frac{1}{\eta_{1/2}} \cdot \frac{y_{1/2}}{x_{1/2}}, \quad (2.134)$$

где $\eta_{1/2}$ – некоторое «половинное» значение соответствующее значению $u_x/u_{xm} = 0.5$; $x_{1/2}$; $y_{1/2}$ – значение координат точек, в которых $u_x/u_{xm} = 0.5$. Для плоских и веерных струй $\eta_{1/2} = 0.88$, для осесимметричных – $\eta_{1/2} = 1.8$. В этой работе приводятся ориентировочные данные для коэффициента a [149]: для плоской и веерной струи $a = 0,1 - 0,12$; для круглой струи $a = 0,045 - 0,055$. Учитывая, что в данном случае имеет место двухкомпонентная струя, то коэффициент a несколько выше, чем отмечалось ранее.

Таким образом, расчетные формулы для поля скоростей веерной струи в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \bar{u}_x &= \frac{K_{u_x}}{\bar{x}ch^2\eta}; \quad \bar{u}_y = \frac{K_{u_y}}{\bar{x}} \frac{\eta - 0,5sh(2\eta)}{ch^2\eta}; \quad \bar{u}_\varphi = \frac{K_{u_\varphi}}{(\bar{x})^2} \frac{1}{ch^2\eta}; \\ \eta &= \frac{\bar{y}}{a\bar{x}}, \quad \bar{u}_x = u_x/u_{x0}; \quad \bar{u}_y = u_y/u_{x0}; \quad \bar{u}_\varphi = u_\varphi/u_{x0}, \end{aligned} \quad (2.135)$$

где $\bar{x} = x/b_0$; $\bar{y} = y/b_0$; $\bar{r}_0 = r_0$; $K_{u_x} = \frac{\sqrt{3\bar{r}_0}}{4a}$; $K_{u_y} = \sqrt{\frac{3a\bar{r}_0}{4}} = aK_{u_x}$; $K_{u_\varphi} = K_{u_x} \frac{\bar{r}_0}{tg\gamma}$.

2.3. Траектории частиц в полости бункера при различных схемах пневмозагрузки

Рассмотрим динамику частиц в осесимметричной струе, которая формируется за счет завихрителя в вертикальном канале диаметром d_0 . Для интегрирования уравнения динамики частиц (2.32)-(2.35), используем поле скоростей, описываемое системой уравнений: (2.68), (2.72), (2.77). Перейдем к безразмерной форме этих уравнений, используя в качестве характерного геометрического размера диаметр бункера D_1 :

$$l_\infty = D_1; \quad (2.136)$$

скорости воздуха в патрубке:

$$u_{\infty} = u_0 = \frac{4Q}{\pi d_0^2}; \quad (2.137)$$

и времени

$$\tau_{\infty} = \frac{D_1}{u_0}. \quad (2.138)$$

Тогда поле безразмерных скоростей воздуха в струе будет описываться следующей системой уравнений:

$$\frac{u_x}{u_{\infty}} = \frac{u_x}{u_0} = \frac{A}{D_1 u_0 x_1} \cdot \frac{F'}{\eta}; \quad (2.139)$$

$$\frac{u_y}{u_{\infty}} = \frac{u_y}{u_0} = \frac{A}{D_1 u_0 x_1} \cdot \left(F' - \frac{F}{\eta} \right); \quad (2.140)$$

$$\frac{u_{\varphi}}{u_{\infty}} = \frac{u_{\varphi}}{u_0} = \frac{C}{D_1^2 u_0 x_1^2} \cdot \Phi; \quad \tau_{\infty} = \frac{D_1}{u_0}. \quad (2.141)$$

где $\eta = \frac{x_2}{a \cdot x_1}$; x_1 и x_2 – безразмерные координаты точки траектории частицы (x и y , отнесенные к диаметру бункера).

Постоянные коэффициенты в правых частях уравнений (2.139)-(2.141) обозначим:

$$A_1 = \frac{A}{D_1 u_0}; \quad A_2 = \frac{A \bar{a}}{D_1 u_0}; \quad A_3 = \frac{C}{D_1^2 u_0}, \quad (2.142)$$

где \bar{a} – функции, определяющие изменение безразмерных скоростей:

$$f_1 = \frac{F'}{\eta} = \frac{1}{z_1^2}; \quad (2.143)$$

где $z_1 = 1 + \frac{1}{8} \eta^2$;

$$f_2 = \frac{\frac{F'}{\eta} - \frac{F}{\eta}}{\frac{\eta}{z_1^2} - \frac{0,5\eta}{z_1}} = \frac{\eta}{z_1} \left(\frac{1}{z_1} - 0,5 \right); \quad (2.144)$$

$$f_3 = \Phi = F' = \frac{\eta}{z_1^2} = \eta f_1. \quad (2.145)$$

Тогда систему (2.139)-(2.141) перепишем в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_x}{u_0} &= \frac{A_1}{x_1} \cdot f_1; \\ \frac{u_y}{u_0} &= \frac{A_2}{x_1} \cdot f_2; \\ \frac{u_\varphi}{u_0} &= \frac{A_3}{x_1^2} \cdot f_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.146)$$

а уравнение траектории частиц:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_4; \quad \dot{x}_2 = x_5; \quad \dot{x}_3 = x_6; \\ \dot{x}_4 &= Fr + \frac{1}{St} \left(\frac{u_x}{u_\infty} - x_4 \right); \\ \dot{x}_5 &= x_2 \cdot x_6 + \frac{1}{St} \left(\frac{u_y}{u_\infty} - x_5 \right); \\ \dot{x}_6 &= \frac{1}{x_2} \left(-2x_2 x_6 + \frac{1}{St} \left(\frac{u_\varphi}{u_\infty} - x_2 x_6 \right) \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2.147)$$

где Fr – число Фруда, учитывающее действие сил тяжести, St – число Стокса, учитывающее действие аэродинамических сил.

Определим начальные условия для частиц материала. Начальные координаты:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 0; \\ x_2 &= \frac{d_0}{2D_1}; \\ x_3 &= 0; \end{aligned} \right\} \text{ при } \tau = \frac{t}{\tau_\infty} = \frac{t D_1}{u_0}. \quad (2.148)$$

Что касается начальной скорости частиц, то здесь могут быть варианты. Для части тонких частиц, скорость витания которых намного меньше скорости транспортирующего воздуха, начальная скорость отождествляется со скоростью воздуха при выходе из патрубка. В нашем случае:

$$\left. \begin{array}{l} v_x = u_x; \\ v_y = 0; \\ v_\varphi = u_\varphi; \end{array} \right\} \text{при } t = 0, \quad (2.149)$$

или в безразмерном виде:

$$\left. \begin{array}{l} x_4 = 1; \\ x_5 = 0; \\ x_6 = \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{2D_1}{d_0 \operatorname{tg} \gamma}; \end{array} \right\} \text{при } \tau = 0. \quad (2.150)$$

2.4. Результаты исследований пылеаэродинамики бункеров при различных способах загрузки

С использованием приведенных соотношений и уравнений в среде универсальной математической среды Maple составлены программы расчета полей скоростей воздушных потоков и траекторий частиц (см. приложения Б-Г).

Автомодельное течение в свободных струях достаточно точно описывается приведенными в п. 2.2 соотношениями для основных участков, поэтому, на достаточном удалении от патрубка, корректно сравнивать траектории при разных схемах загрузки бункеров при $x_1(0) = 0,1$ и однородных начальных составляющих скоростей частицы ($x_4(0) = x_5(0) = x_6(0) = 0$). Этим отсекаем влияние начальной скорости на координаты траектории и исключить область физически необязательных бесконечно больших скоростей воздуха в начальном участке струи (особенно в области $x_1(0) \ll 0,1$).

Полученные профили скоростей (рисунки 2.5-2.7) характеризуют динамику пылевоздушных потоков в полости бункера: значение продольной скорости характеризует пылеобразование при соударении струи падающего материала с преградой, а по поперечной скорости – об интенсивности эжекции воздуха, динамика окружной скорости используется для правильного построения траекторий движения пылевых частиц.

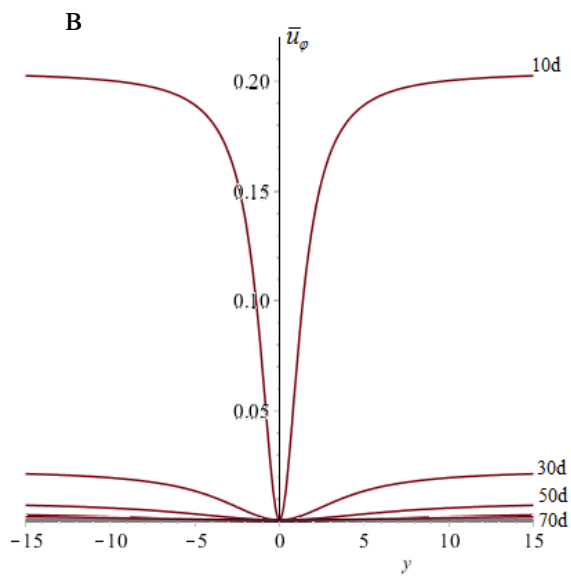
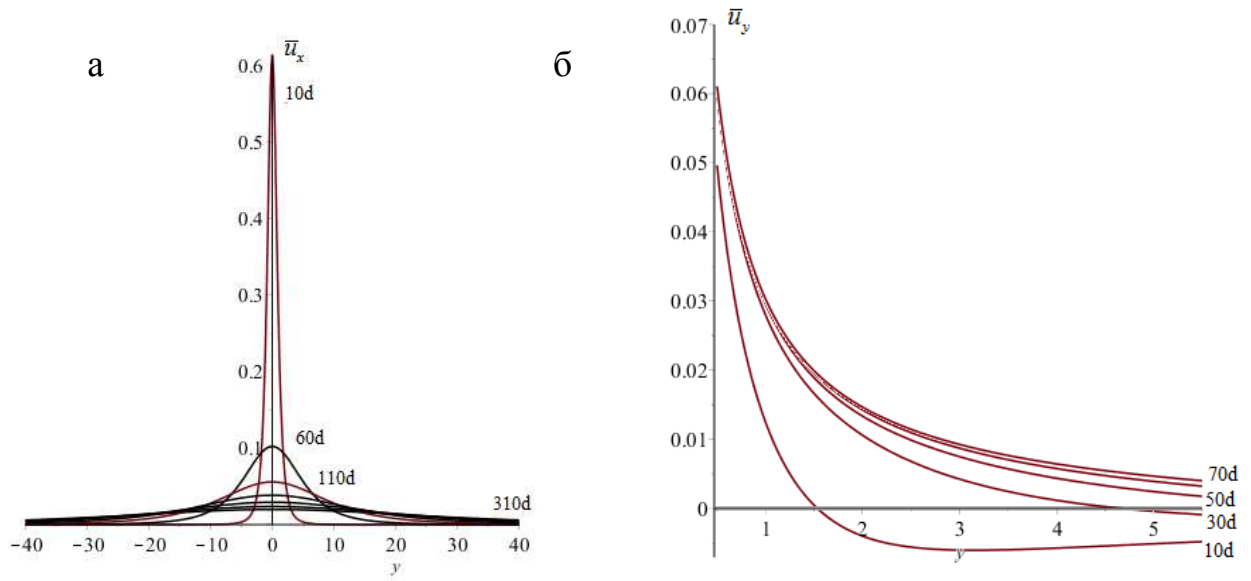


Рисунок 2.5. Поле скоростей воздушной струи при формировании осесимметричной свободной струи в узле загрузки бункера:
 а – продольная составляющая скорости;
 б – поперечная составляющая скорости;
 в – окружная составляющая скорости

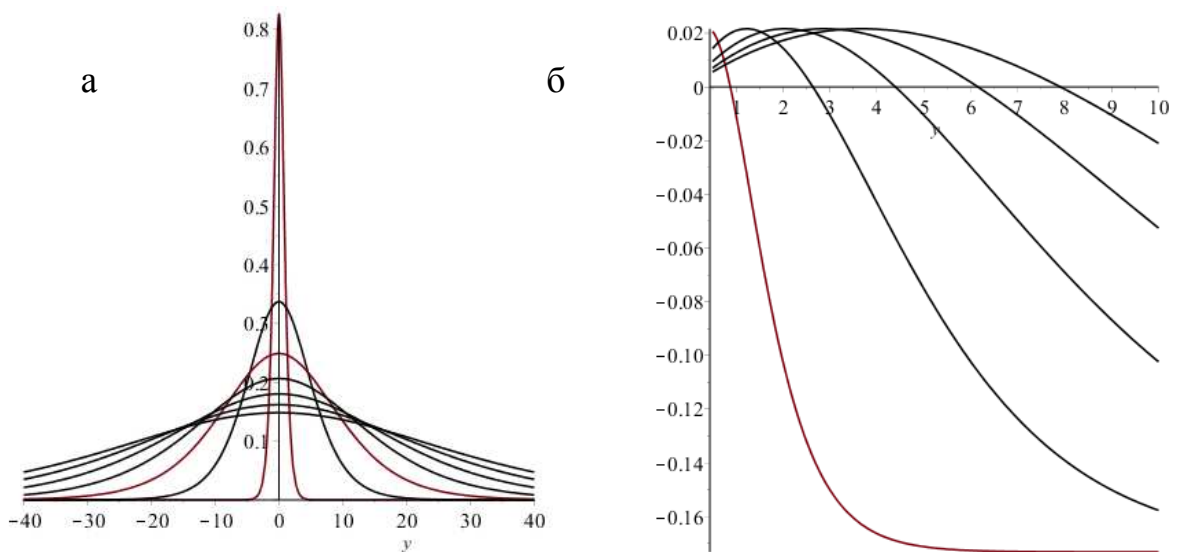


Рисунок 2.6. Поле скоростей воздушной струи при формировании плоской струи в узле загрузки бункера: а – продольная составляющая скорости; б – поперечная составляющая скорости

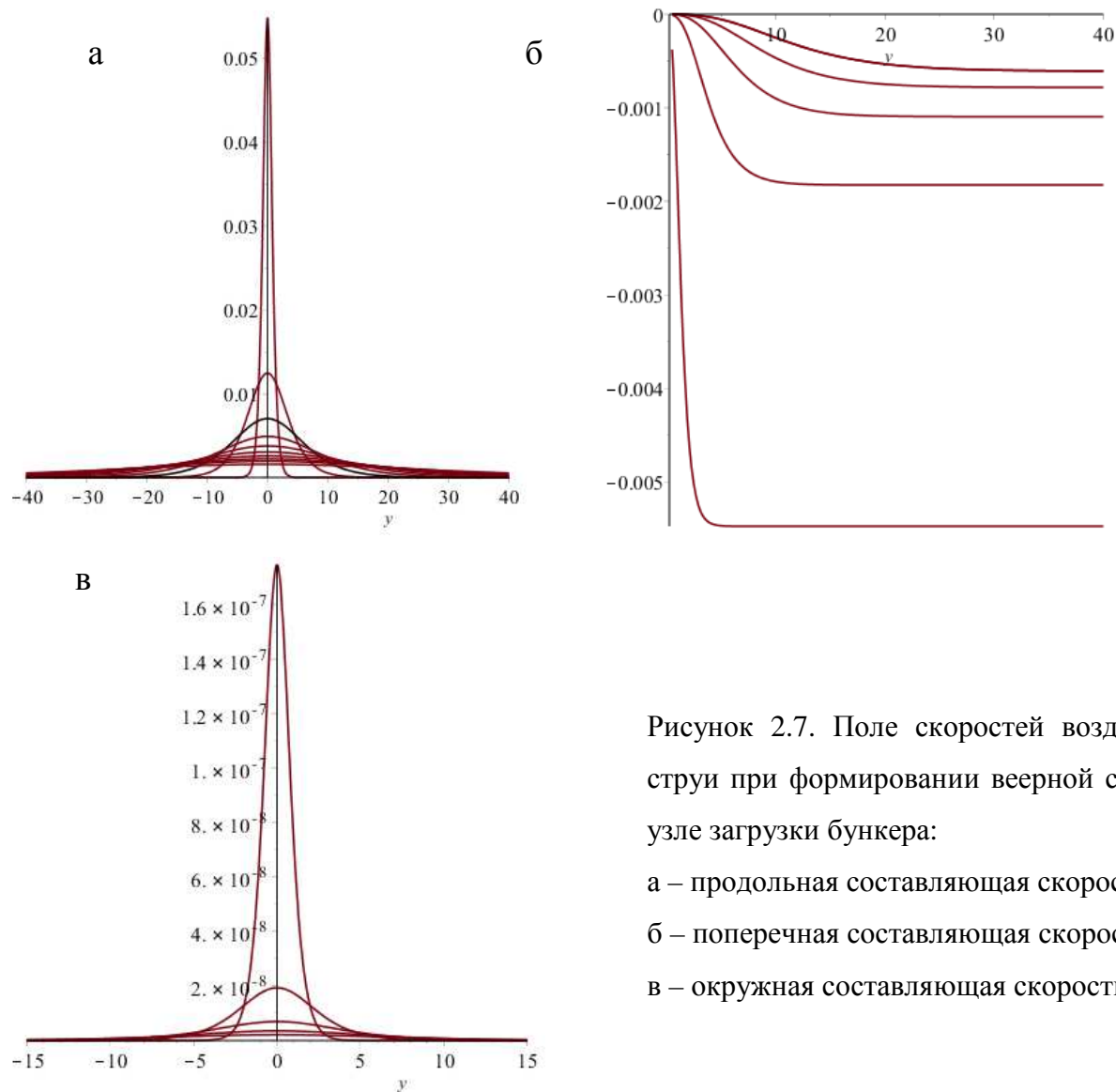


Рисунок 2.7. Поле скоростей воздушной струи при формировании веерной струи в узле загрузки бункера:

- а – продольная составляющая скорости;
- б – поперечная составляющая скорости;
- в – окружная составляющая скорости

Согласно рисунку 2.6 можно сделать вывод, что пылеобразование при контакте с поверхностью материала и плоской струи будет выше, поскольку продольная скорость затухает с меньшей интенсивностью, при этом и эжектирующая способность у плоской струи выше, чем у осесимметричной.

На рисунке 2.8 приведено сравнение осевых максимальных скоростей при удалении от крышки бункера. Можно сделать вывод о том, что пылеобразующая способность веерной струи значительно ниже осесимметричной и плоской струй.

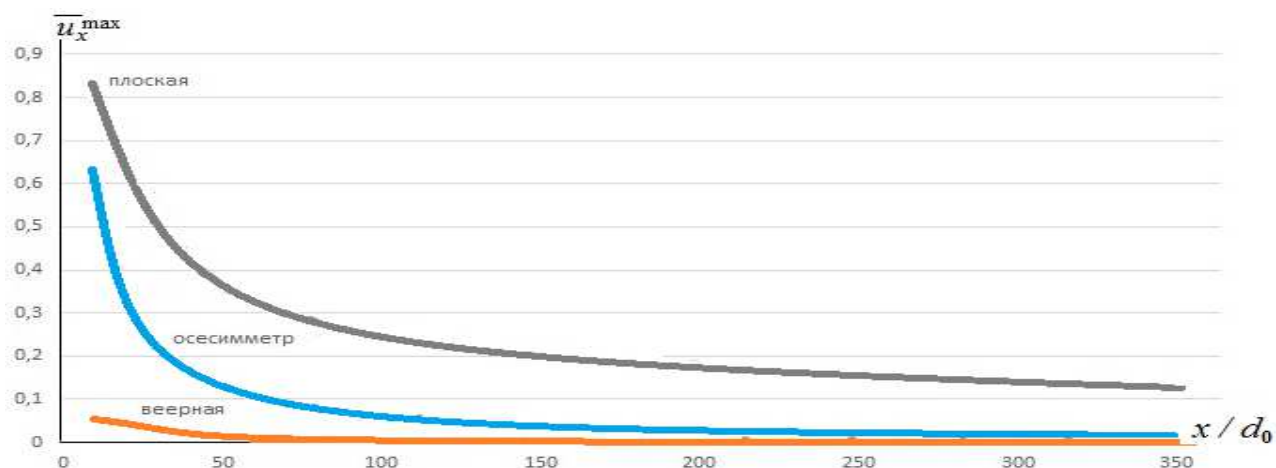


Рисунок 2.8. Изменение осевой скорости струи при удалении от крышки бункера

Что подтверждает идею работы: формирование веерной струи снижает взаимодействие с загруженным материалом, таким образом снижает пылеобразование при загрузке материала.

Однако, на конечное значение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе от бункера может повлиять унос материала непосредственно из загрузочной струи. Для анализа динамики пылевых частиц в полости бункера на основании полученных соотношений и уравнений в среде универсальной математической среды Maple составлена программа расчета траектории частиц (см. приложение Д).

Результат расчета для частиц диаметрами 5, 10 и 15 мкм при движении в условиях формирования веерной струи приведен на рисунке 2.9.

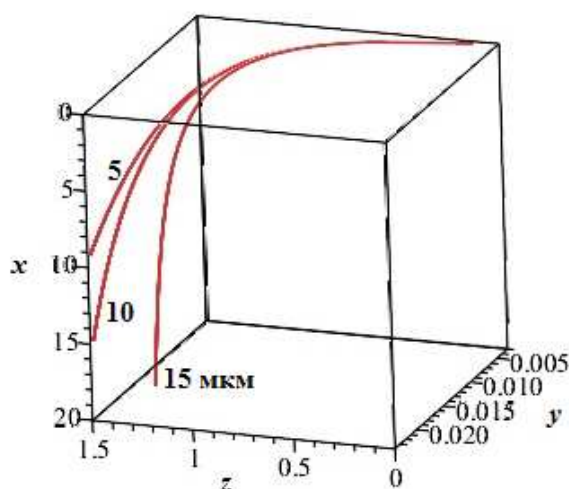


Рисунок 2.9. Траектории пылевых частиц различного диаметра при формировании веерной струи

2.5. Выводы к главе 2

1. Из дифференциальных уравнений классической теории пограничного слоя получены аналитические выражения динамики свободных струйных течений различных типов, формирующихся при загрузке бункеров: осесимметричных, плоских и веерных струй.

2. При помощи полученных аналитических выражений для расчета скорости воздушного потока построены профили продольных, поперечных и осевых скоростей осесимметричной, плоской и веерной струй.

3. Проведено сравнение взаимодействия струй различного типа с материалом, загруженным в бункер, отмечено минимальное взаимодействие веерной струи. Что подтверждает идею работы: формирование веерной струи снижает взаимодействие с загруженным материалом, что эрозию и пылеобразование.

4. При помощи численного интегрирования дифференциального уравнения динамики пылевой частицы построены траектории пылевых частиц при загрузке бункера с формированием веерной струи, характеризующие ее сепарационные особенности.

3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА

3.1. Разработка принципиальной схемы узла загрузки бункеров, обеспечивающего снижение пылеобразования

Известно устройство на основе эффекта Коанда для снижения пылеобразования при складировании сыпучих материалов [94] работающее следующим образом: сыпучий материал вместе с потоком воздуха поступает на выход щелевого сопла 1 (рисунок 3.1 а). Далее сыпучий материал 12, под действием сил инерции и сил тяжести продолжает двигаться в направлении заданным щелевым соплом 1. Давление воздуха у щелевого сопла 1 понижается и поток воздуха, истекающий из сопла 1 частично попадает через прорезь 4 разрезного цилиндра 2 внутрь его, где возникает циркуляционный вихревой поток, а основная масса воздуха 13 "прилипает" к наружной стенке цилиндра и совершает поворот на 180°, попадая в воздухозаборник б, откуда отводится с помощью устройства для отвода газа 7, например центробежного вентилятора.

Таким образом, осуществляется разделение сыпучего материала 12, который складировается в месте 11, и потока воздуха 13. Поток воздуха не контактирует с уже складированным сыпучим материалом 11, поэтому не возникает пылеобразования. Мельчайшие частички пыли увлекаются потоком воздуха 13 и попадают в воздухозаборник б, откуда поток воздуха может поступать на систему пылеочистки.

Диаметр разрезного цилиндра 2, размеры прорези 4, параметры щелевого сопла 1 и его установки относительно разрезного цилиндра 2 определяются исходя из вида сыпучего материала, расхода воздуха.

Недостатками данного устройства являются: необходимость изготовления и установки сопла с модифицированными параметрами при изменении вида сыпучего материала и расхода воздуха, а также повышенный унос материала системой пылеочистки из-за низкой степени отделения сыпучего материала от транспортирующего газа.

Известен центробежный пылеотделитель Оспанова А.М.; Балабекова О.С.;

Горбунова В.А. и др. [159] (рисунок 3.2 б) Пылеотделитель в месте соединения корпуса 1 прямоугольного сечения с бункером 5 снабжен вращающимся валком 4. Периферийная стенка 2 имеет правильную круговую форму, а противоположная стенка 3 выполнена таким образом, что в сторону движения газового потока происходит сужение поперечного сечения корпуса 1. Нижняя кромка стенки 2 расположена по линии касания к валку 4 в верхней ее точке, а стенка 3 присоединяется к верхней стенке бункера 5, расположенной в одной плоскости с точкой касания стенки 2 с вращающимся валком 4, при этом валок вращают со скоростью, равной скорости газового потока в месте их контакта.

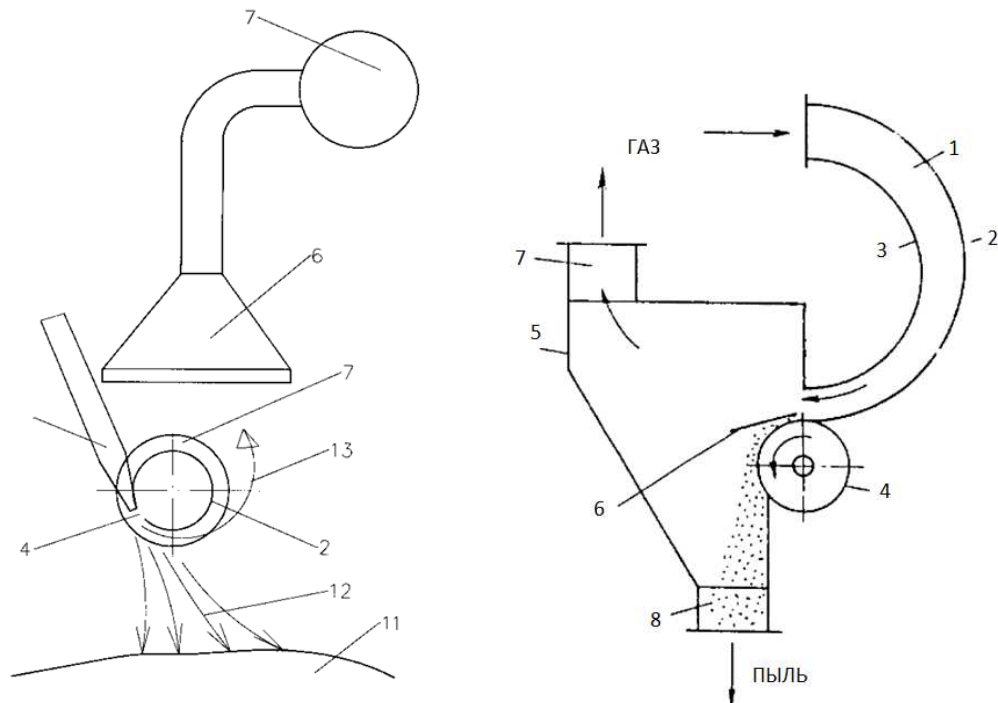


Рисунок 3.1 а – устройство снижения пылеобразования Завьялова Ю.И.;
б - центробежный пылеотделитель

Основными недостатками данного устройства являются потребность в электроэнергии для приведения в движение валка, а также сложность конструкции.

Струйно-инерционный пылеуловитель конструкции [160] (рисунок 3.2 а) работает следующим образом: «запыленный газ поступает в приемное устройство и истекает из сопла. Поток газа «прилипает» к выпуклой криволинейной поверхности (4) и распространяется по ней в окружном направлении согласно

эффекту Коанда. Под действием центробежных сил частицы пыли вылетают из струи и попадают в камеру осаждения (8). После отрыва от криволинейной поверхности поток распространяется по законам обычной затопленной струи на вертикальную стенку (14) под произвольным углом, при этом в потоке устанавливается разделительная линия тока. Очищенный газ с низкой концентрацией пыли, расположенный выше этой линии, поступает в устройство для отвода очищенного газа (7). Поток с высокой концентрацией пыли растекается вниз от разделительной линии по поверхности вертикальной стенки (14) и через щель из него удаляется часть пыли. Для создания циркуляционной зоны течения (17) и устранения прорыва этого потока в камеру осаждения на стенке установлен направляющий щиток (13), стекая с которого запыленный газ сталкивается с периферийной частью основной струи. При этом образуется вторичная низко импульсная струя (18), с которой уходит часть загрязненного потока в камеру осаждения и выносятся значительное количество пыли» [160].

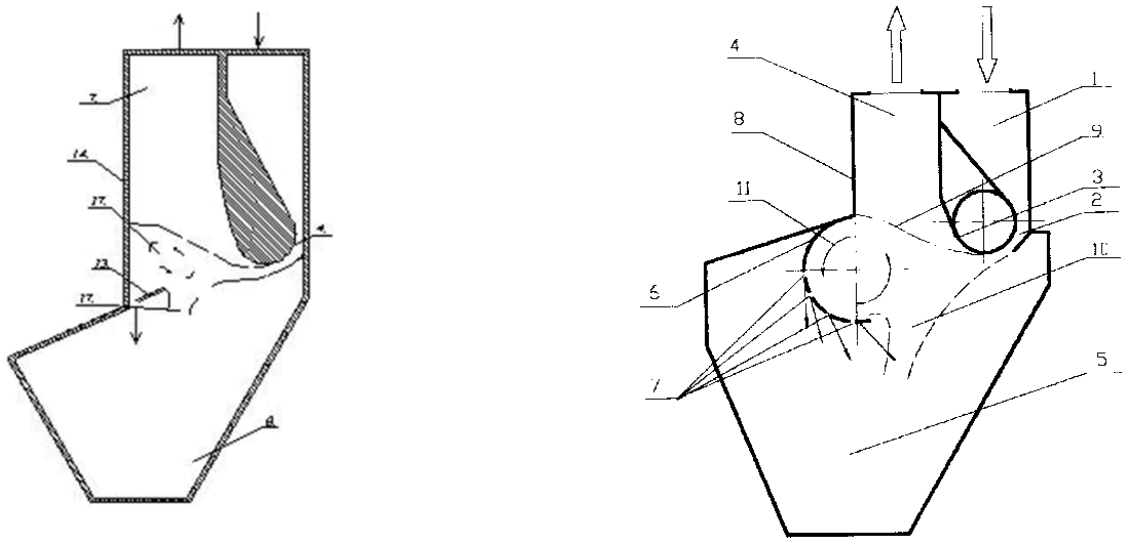


Рисунок 3.2. Струйно-инерционный пылеуловитель: а) конструкция по пат. RU 2102115
б) модернизированная конструкция

Основным недостатком данной конструкции является осаждение пыли на щитке, ее постепенное накапливание и последующее прекращение сепарации через прилегающую щель.

Струйно-инерционный пылеуловитель был в последствии доработан, как это показано на рисунке 3.2 б.

Пылеуловитель работает следующим образом: «запыленный газ попадает в устройство 1 и истекает из щелевого сопла 2. Поток газа прилипает к выпуклой криволинейной поверхности 3 и распространяется в окружном направлении согласно эффекту Коанда. Под действием сил инерции относительно крупные частицы вылетают из струи и попадают в камеру осаждения 5. После отрыва от криволинейной поверхности поток распространяется по законам обычной затопленной турбулентной струи. При натекании струи на стенки 6 и 8 в потоке устанавливается разделительная линия тока 9. Газ, расположенный выше этой линии, поступает в устройство для отвода очищенного газа 4. Поток с высокой концентрацией пыли растекается вниз от разделительной линии по полуцилиндрической стенке 6, образуя циркуляционное течение 11. Под действием центробежных сил и сил тяжести частицы сепарируются через щели 7, расположенные в нижней части стенки 6 и удаляются в камеру осаждения 5. Радиус полуцилиндрической стенки 6 подбирается таким образом, чтобы разделительная линия тока 9 попадала на границу плоской 8 и полуцилиндрической 6 стенок» [79].

В данном пылеуловителе, в отличие от прототипа, вертикальная стенка, на которую натекает струя, заменена на плоскую 8 и полуцилиндрическую 6. Одна щель, образуемая вертикальной стенкой и щитком в прототипе, заменена несколькими щелями в нижней части полуцилиндрической стенки. Щели 7 в нижней части полуцилиндрической стенки 6 не допускают пылевых отложений на ней, пыль сепарируется через щели и попадает в камеру осаждения. Нижняя часть полуцилиндрической стенки 6 играет роль щитка. Стекая с нее, запыленный поток сталкивается с периферийной частью струи, выходящей из щелевого сопла 2 и образует вторичную низко импульсную струю 10. В устройстве уменьшается аэродинамическое сопротивление: установкой полуцилиндрической стенки удается избежать лобового натекания струи на плоскую стенку 8 ниже разделительной линии тока.

Полезная модель устройства загрузки сыпучих материалов поясняется на рисунке 3.3.

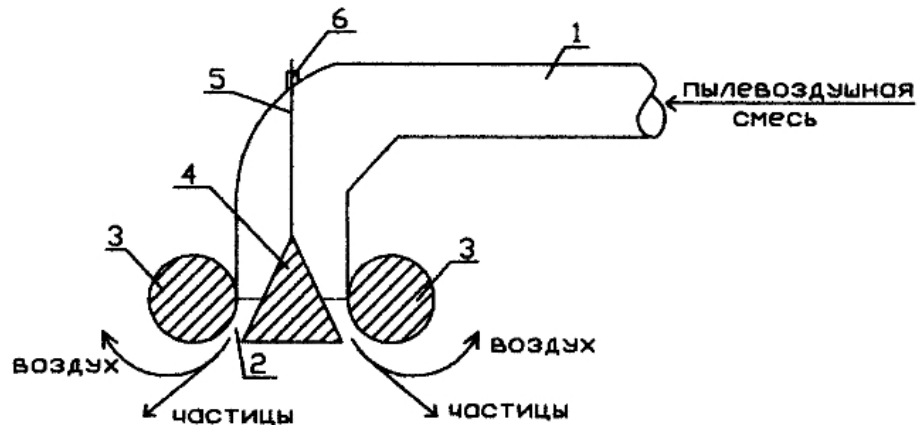


Рисунок 3.3. Устройство для снижения пылеобразования при загрузке

Устройство работает следующим образом: предварительно осуществляется настройка устройства путем вертикального перемещения стержня 5 и конуса 4: исходя из расхода воздуха, а также вида, плотности и крупности сыпучего материала выбирается рациональная величина зазора между тором 3 и конусом 4, обеспечивающая наибольший угол отклонения потока при исключении возможности забивания сыпучим материалом сопла 2. После проведения настройки положение стержня и конуса закрепляется контргайкой 6, а по трубопроводу 1 пневмотранспорта на вход сопла 2 подается смесь сыпучего материала и газа, например, цементно-воздушная смесь. При движении по соплу 2 сыпучий материал под действием сил инерции перемещается к стенке конуса 4, что обеспечивает его смещение в периферийную зону потока еще до отрыва струи от конуса 4, облегчая выход частиц из струи. Струя воздуха, вытекая из сопла с высокой скоростью, увлекает окружающий воздух, но поверхность тора препятствует свободному поступлению воздуха с одной стороны струи, способствуя понижению давления у поверхности тора и «прилипанию» к ней струи воздуха. Так как тор, при прочих равных параметрах, имеет большую площадь поверхности по сравнению с цилиндром по прототипу, то это способствует увеличению «прилипающих» и очищающихся объемов газа. Под действием инерционных сил частицы сыпучего материала вылетают из струи, продолжая двигаться в направлении, которое задается образующими конуса 4. Таким образом,

поток сыпучего материала движется в место складирования, а поток газа разворачивается согласно эффекту Коанда и отводится с помощью устройства для отвода газа, например, любой существующей системой аспирации.

3.2. План, программа и методика проведения экспериментальных исследований

3.2.1. Цели и задачи экспериментальных исследований

В результате проведенных аналитических исследований установлено, что снизить пылеобразование возможно за счет организации воздухораспределения в полости бункера, в частности изменения направления движения воздушной струи, движущейся вдоль криволинейной поверхности, т.е. создание условий для проявления аэродинамического эффекта Коанда.

Целью экспериментальных исследований является определение влияния конструктивно-технологических характеристик на условия возникновения и устойчивого развития коандовского течения при истечении воздушного потока через предлагаемое устройство.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать план проведения экспериментальных исследований;
- разработать и сконструировать экспериментальную установку;
- разработать методику измерения параметров воздушного потока;
- экспериментально установить аэродинамические характеристики потока, при различных начальных аэродинамических параметрах и геометрических характеристик загрузочного устройства.

Главная проблема при планировании эксперимента заключается в выборе значений факторов при проведении эксперимента, в последовательности их чередования при переходе от одного опыта к другому. Данная проблема имеет принципиальное значение, так как от способа варьирования значений факторов зависит точность оценки степени влияния отдельных факторов в многофакторном эксперименте на параметр щели, а также время проведения эксперимента. Поэтому для снижения трудоемкости и времени проведения эксперимента необходимо

придерживаться определенного алгоритма действий (см. рисунок 3.4).



Рисунок 3.4. Схема проведения многофакторного эксперимента

3.2.2. Планирование эксперимента

Согласно результатам аналитических исследований, выполненных в главе 1, в качестве основных факторов, влияющих на налипание струи (реализацию эффекта Коанда) при работе устройства для снижения пылеобразования, показанного на рисунке 3.3, выделим следующие геометрические характеристики (рисунок 3.5): диаметр (или радиус) тора, ширина щели между конусом и тором, и положение данной щели:

$$v_i = f(d_{\text{кон}}; d_{\text{т.кон}}; d_{\text{тор}}; d_{\text{вх}}; H_{\text{к}}; h_{\text{кон}}; v_{\text{вх}}). \quad (3.1)$$

Согласно существующим рекомендациям к планированию эксперимента (1) такое количество факторов может привести к повышению количества натуральных экспериментов и неоправданным затратам времени и других ресурсов. Так как

проведение даже численного эксперимента с данным количеством факторов неоправданно, нами были выделены факторы, которые позволили учесть максимальное количество геометрических размеров предлагаемого устройство и при этом обеспечить вписывание конуса в тор:

геометрические характеристики обтекателя потока (тора):

$$R_1 = R_2 \cdot \sin \alpha; \quad (3.2)$$

геометрические характеристики разделителя потока (конуса):

$$(3.3)$$

$$\beta = 180 - \alpha - \gamma; \quad (3.4)$$

геометрические характеристики взаимного расположения разделителя и обтекателя потока:

$$\sin \gamma = \frac{H}{R_2}; \quad H = R_2 \cdot \sin \gamma; \quad (3.5)$$

$$\gamma = 180 - \alpha - \beta; \quad (3.6)$$

$$\sin \alpha = \frac{R_1}{R_2}. \quad (3.7)$$

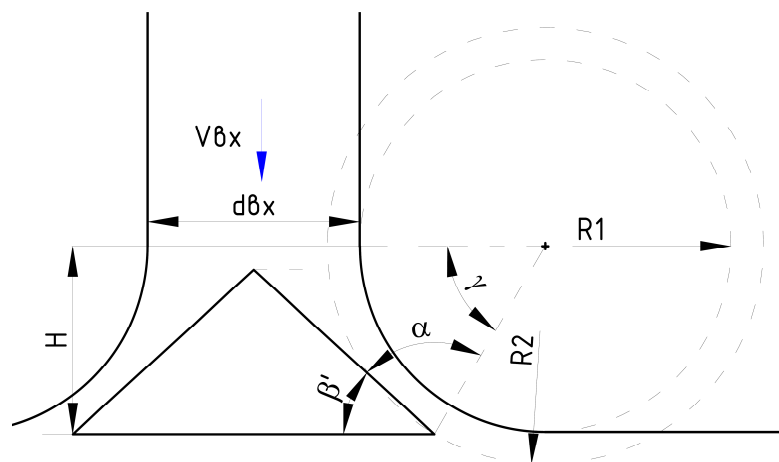


Рисунок 3.5. Основные геометрические характеристики устройства

В качестве отклика принята максимальная V_{\max} и средняя V_{med} составляющая проекции скорости на ось X. Для снижения количества факторов эксперимента группируем их, тогда зависимость (3.1), примет вид:

$$v_i = f\left(\frac{R_1}{R_2}; \frac{\beta'}{\beta}; \gamma\right). \quad (3.8)$$

В качестве плана эксперимента принят ЦКОП (центральный композиционный ортогональный план). В таблице 3.1. приведена область факторного пространства выбранного плана эксперимента. Для учета условий работы устройства при различных эксплуатационных характеристиках системы пневмотранспорта замеры повторялись при различных начальных скоростях потока: 5, 15, 25 м/с.

Таблица 3.1

Область факторного пространства ЦКОП

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

3.2.3. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рисунок 3.6) для определения условий реализации эффекта Коанда на разрабатываемом устройстве представляет собой воздухораспределитель, состоящий из патрубка с тороидальной поверхностью и конусного разделителя потока, подключенного к вентиляционной сети (рисунок 3.7) гибким (гофрированным) воздуховодом.

В качестве побудителя принят вентилятор ВР-80-75-3,15. Регулировка расхода воздуха производилась регулирующими клапанами.


Для измерения скорости приточного воздуха в точках измерения использовался термоанемометр Testo 425. Измерения производились с помощью зонда с обогреваемой струной, характеристики которого представлены в таблице 3.2.

Все вышеперечисленные приборы внесены в Государственный Реестр средств измерений РФ.



Рисунок 3.6. Экспериментальная установка: а) общий вид экспериментальной установки; б) измерительный прибор; в) элементы устройства снижения пылеобразования: 1 – подающий патрубок с тороидальной поверхностью; 2 – конусный разделитель потока: а – с высотой 60 мм, б – с высотой 40 мм; 3 – воздуховод вентиляционной сети; 4 – воздушный регулирующий клапан; 5 – измерительный зонд; 6 – термоанемометр; 7 – штатив; 8 – координатная сетка (миллиметровка);

Таблица 3.2
Характеристики термоанемометра Testo 425
с зондом с обогреваемой струной

	Параметр	Значение
	Диаметр наконечника	7,5 мм
	Длина трубки зонда	820 мм
	Диапазон измерений	0...20 м/с
	Погрешность	$\pm(0,03 \text{ м/с} + 5\% \text{ от изм. знач.})$
	Рабочая температура	0...70 °С

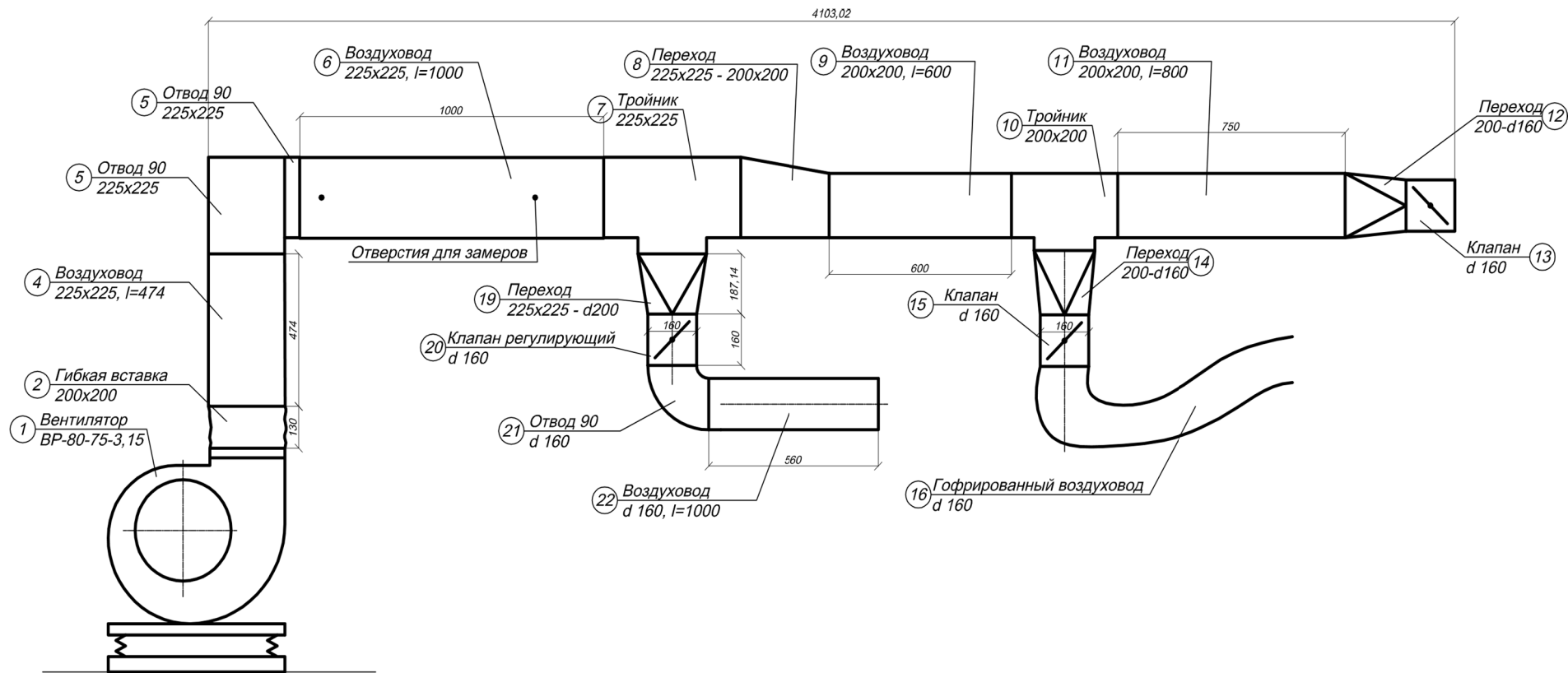


Рисунок 3.7. Нагнетательная ветвь лабораторной вентиляционной сети:

1 – вентилятор ВР-80-75-3,15; 2 – гибкая вставка; 3, 6, 9, 11, 22 – воздуховод; 4, 5, 21 – отвод; 7, 10 – тройник; 8, 12, 14, 19 – переход; 13, 15, 20 – клапан регулирующий; 16 – гофрированный воздуховод

Геометрические характеристики патрубка и характеристики побудителя тяги соответствуют реальным условиям загрузки цементных силосов ЗАО «Белгородский цемент».

Подключение экспериментальной установки к действующей лабораторной вентиляционной сети позволяет количественно регулировать воздушный поток, что обеспечит возможность выполнения замеров при различных эксплуатационных характеристиках.

3.2.4. Методика проведения экспериментальных исследований

Проведение экспериментальных исследований выполняется в соответствии с принятым центральным композиционным ортогональным планом эксперимента, в следующей последовательности.

1. Выбрать необходимый разделитель потока (конус).
2. Установить его относительно обтекателя (тора) путем вертикального перемещения и фиксации на определенном уровне.
3. Включить вентилятор в сеть.
4. Обеспечить необходимую скорость в устье исследуемого устройства путем ограничения расхода воздуха регулирующими клапанами 13, 15, 20, поступающего в воздуховод 16 (рисунок 3.12).
5. Установить зонд термоанемометра в определенную точку на линии измерения, находящейся на расстоянии $2d$ от оси тора (или $3,5d$ от центра патрубка), где d – диаметр подающего патрубка).
6. Произвести замеры температуры, скоростей (максимальной и усредненной по времени) потока.
7. Замеры производить в 5 точках линии измерения скорости, перпендикулярной координатной сетке, расположенной на расстоянии $3,5d$ от центра патрубка, где d – диаметр подающего патрубка, высота линии измерения скорости соответствует диаметру подающего патрубка d .

Высота линии измерения скорости равна 0,12 м. Точки замера соответствуют точкам замера на высотах: 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1.

При проведении замеров также необходимо фиксировать температуру внутреннего воздуха в помещении.

3.3. Результаты экспериментальных исследований условий реализации эффекта Коанда на разрабатываемом устройстве

Измерения проводились при значении температуры воздуха $t=21,3^{\circ}\text{C}$.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 3.3 при начальной скорости потока 5 м/с. Для снижения трудоемкости и материалоемкости при изготовлении элементов экспериментальной установки, в частности разделителя потока (конуса), проведем сравнение с результатами вычислительного эксперимента, выполненного с помощью программного комплекса SolidWorks.

Таблица 3.3
Результаты натурных экспериментальных исследований

№ эксперимента	Скорость, м/с						результаты численного эксперимента	
	натурные замеры в точках линии измерения скорости					среднее значение по линии измерения скорости	SolidWorks	ур-я регрессии
	т.1	т.2	т.3	т.4	т.5			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4,63	4,54	4,52	3,97	3,27	4,186	4,76	4,205
2	2,53	1,42	1,21	1,04	0,56	1,352	1,2	1,299
3	0,91	0,69	0,53	0,51	0,42	0,612	0,64	0,478
4	0,09	0,23	0,61	1,1	0,73	0,552	0,23	-0,266

Сравнение средних значений скорости с расчетами (таблица 3.3) показывает высокую степень их связи. Коэффициент корреляции Пирсона равен $0,998 \pm 0,0029$. Достоверность расчетов подтверждаются критерием Стьюдента равным 0,024, адекватность расчетов подтверждается критерием Фишера равным 1,47.

Таким образом, хорошая сходимость результатов, проведенных вычислительных и лабораторных экспериментов, позволяет использовать для дальнейших экспериментальных исследований программный комплекс SolidWorks, в соответствии с разработанным планом. На рисунке 3.8 приведены граничные условия проведения вычислительного эксперимента.

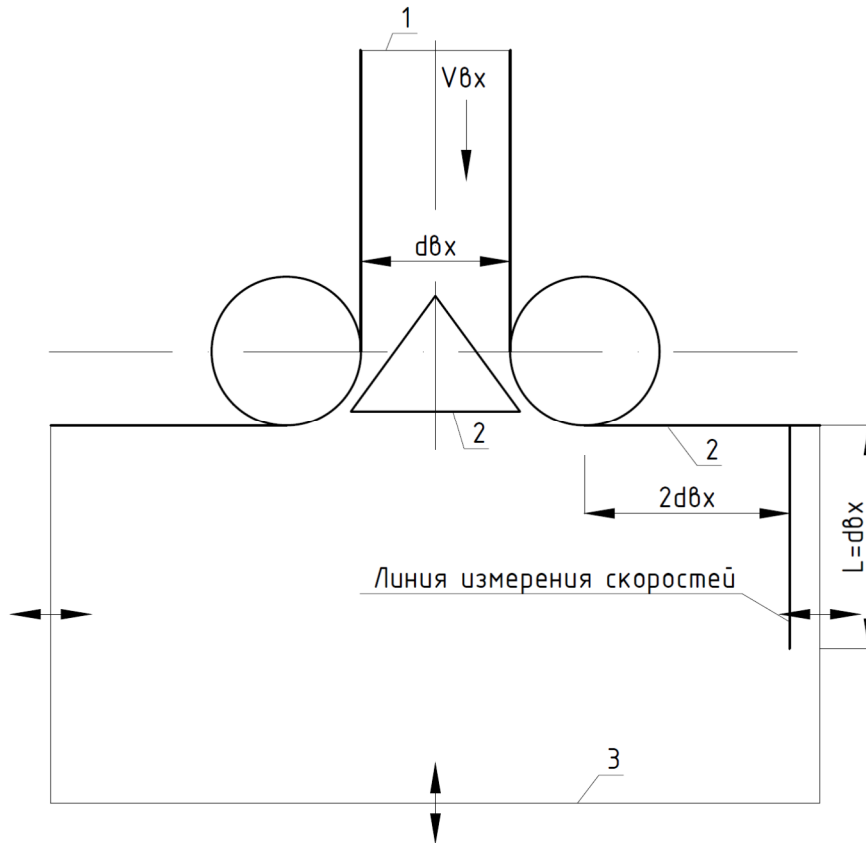


Рисунок 3.8 Граничные условия вычислительного эксперимента: 1 – плоскость входа воздуха;
2 – непроницаемые стенки; 3 – плоскость свободного давления

В таблице 3.4 приведены основные результаты вычислительного эксперимента при различных начальных скоростях потока. Жирным шрифтом выделены результаты экспериментов, в которых произошло налипание струи, что характеризует изменение направления движения струи, согласно эффекту Коанда.

Таблица 3.4
Факторы и результаты вычислительного эксперимента

№ эксперимента	R_1/R_2	β'/β	γ	при $V_{вх}=5$ м/с		при $V_{вх}=15$ м/с		при $V_{вх}=25$ м/с	
				V_{med}	V_{max}	V_{med}	V_{max}	V_{med}	V_{max}
1	0,65	0,15	79	0,3	0,62	0,77	1,89	1,73	3,6
2	0,65	0,15	11	-0,03	0	-0,08	0	-0,17	0
3	0,65	0,85	11	-0,026	0	-0,067	0	-0,12	0
4	0,95	0,85	79	1,54	4,76	4,24	14,51	7,37	26,6
5	0,8	0,5	88,76	0,26	0,7	0,61	1,81	1,12	3,25
6	0,95	0,85	11	0	0,03	0,04	0,17	0,01	0,11
7	0,8	0,5	45	0,13	0,36	0,37	1,04	0,66	1,66

Продолжение таблицы 3.4.

8	0,99	0,5	45	0,63	1,2	1,93	3,61	2,6	5,24
9	0,8	0,95	45	0,07	0,09	0,32	0,74	0,37	0,54
10	0,95	0,15	79	0,31	0,64	0,96	2,05	1,55	3,45
11	0,65	0,85	79	0,08	0,23	0,4	1,23	0,1	0,91
12	0,95	0,15	11	0	0,03	-0,11	-0,01	-0,04	0,11
13	0,8	0,049	45	0,35	0,62	1,07	1,89	2,05	3,14
14	0,61	0,5	45	-0,04	-0,001	-0,12	-0,02	-0,19	-0,02
15	0,8	0,5	45	0,2	0,43	0,56	1,3	0,83	2,17
16	0,8	0,5	1,24	-0,02	0	-0,08	0	-0,11	0

Примечание: V_{\max} – максимальная скорость V_x в плоскости измерения; V_{med} – средняя скорость V_x в плоскости измерения.

Анализ результатов экспериментальных исследований, представленных в таблице 3.4 и рисунке 3.9 показал, что максимальное значение составляющей скорости на ось X достигается в эксперименте №4. Кроме того эффект налипания воздушной струи происходит в экспериментах №1, 4, 5, 7, 8, 10 и 13.

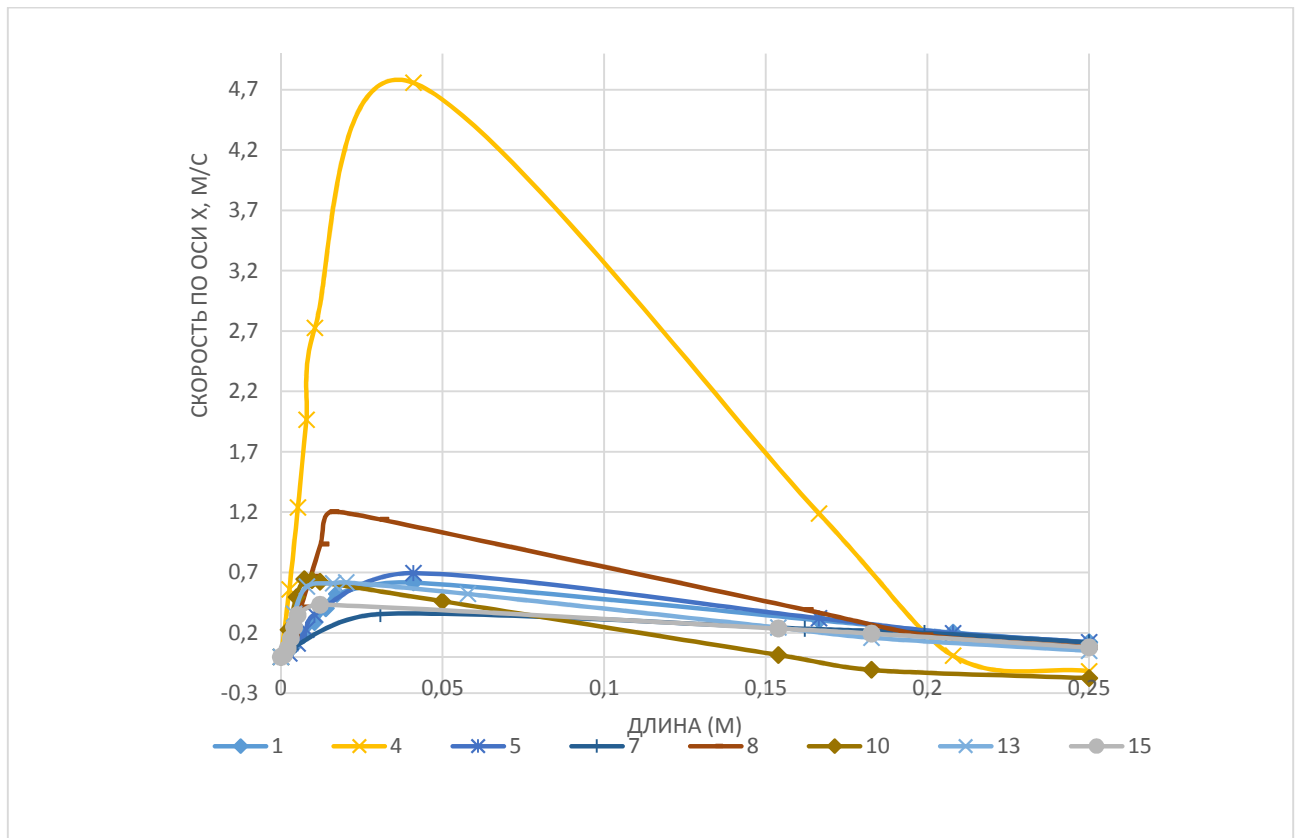


Рисунок 3.9. Профили скоростей на измеряемой линии при $V_{\text{вх}}=5$ м/с, построенные по результатам экспериментов, где произошло налипание струи

При этом устойчивое проявление эффекта Коанда в серии экспериментов при скорости $V_{вх}=5$ м/с проявляется при $V_{med}>0,13$ м/с и $V_{max}>0,36$ м/с.

На рисунке 3.10 приведены результаты экспериментов, в которых коандовское течение не было сформировано, а соответственно геометрические характеристики, соответствующие экспериментам 2, 3, 6, 9, 11, 12, 14, 16 не желательны при работе исследуемого устройства.

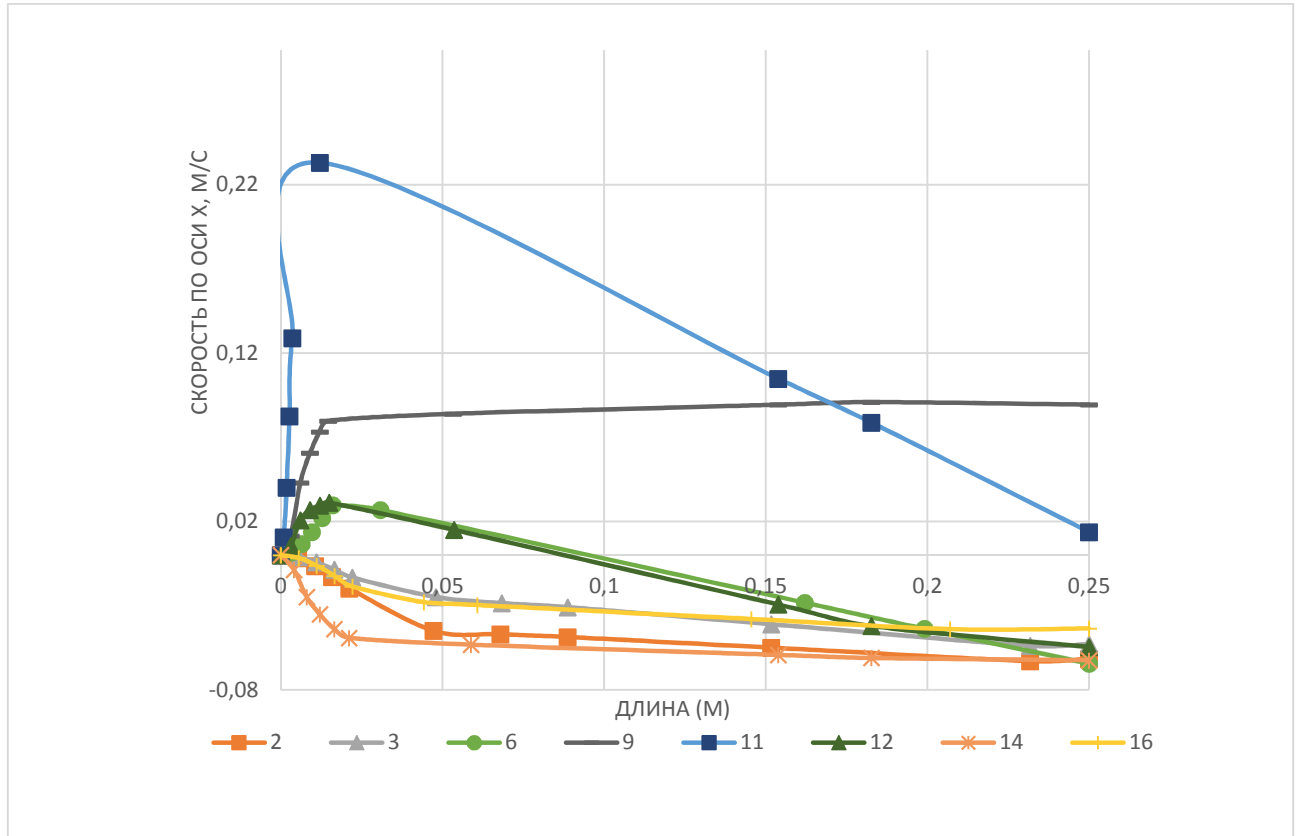


Рисунок 3.10. Профили скоростей на измеряемой линии при $V_{вх}=5$ м/с, построенные по результатам экспериментов, где не произошло налипание струи

В экспериментах 9 и 11 основной поток воздуха устремляется вниз, несмотря на то, что в некоторых направлениях от оси входа воздуха и происходит налипание, но оно является неустойчивым и хаотичным.

На рисунках 3.11 – 3.13 приведены линии тока и вектора движения воздуха, полученные при моделировании работы исследуемого устройства при различных комбинациях факторов эксперимента. Что подтверждает существующую теорию коандовских течений, представленную в п. 1.3 данной работы: сцепление движущегося потока обеспечивает вовлечение в поток окружающей среды.

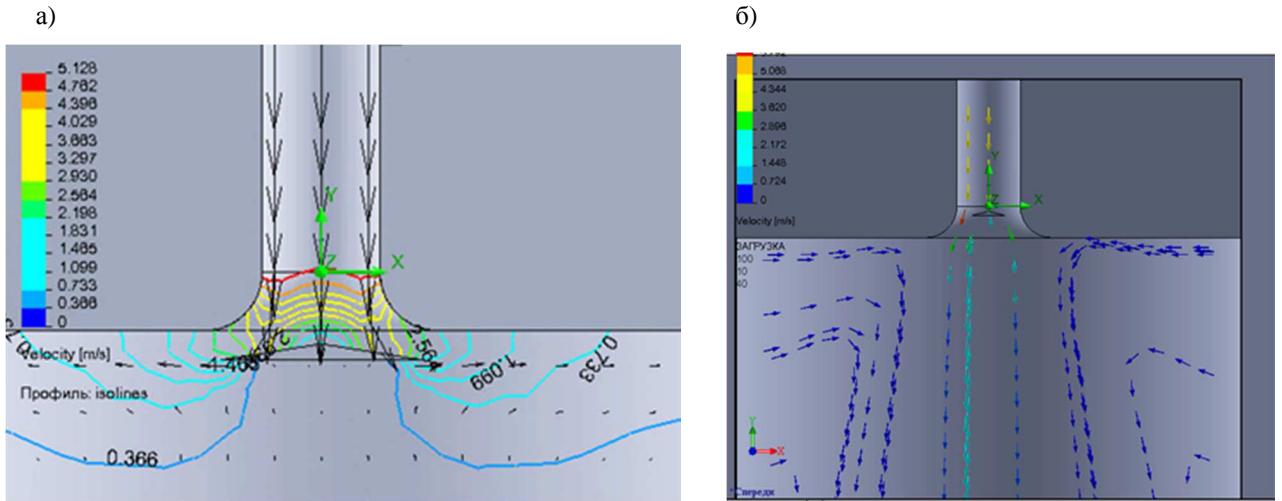


Рисунок 3.11. Линии тока и векторное поле скоростей воздуха, полученные при $V_{вх}=5$ м/с: а) в эксперименте №1; б) в эксперименте №2.

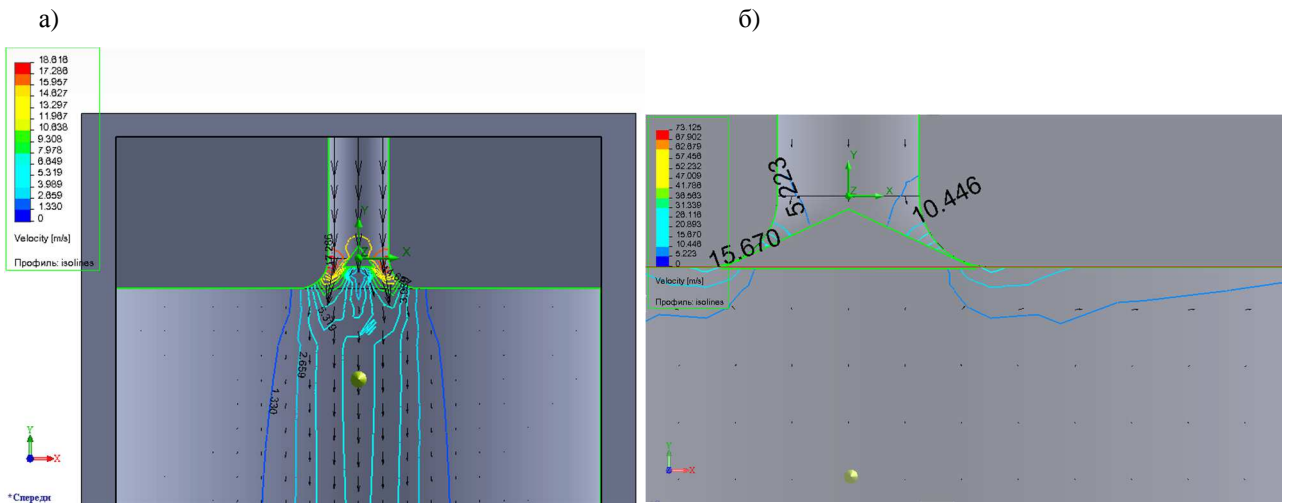


Рисунок 3.12. Линии тока и векторное поле скоростей воздуха, полученные при $V_{вх}=5$ м/с: а) в эксперименте №3; б) в эксперименте №4.

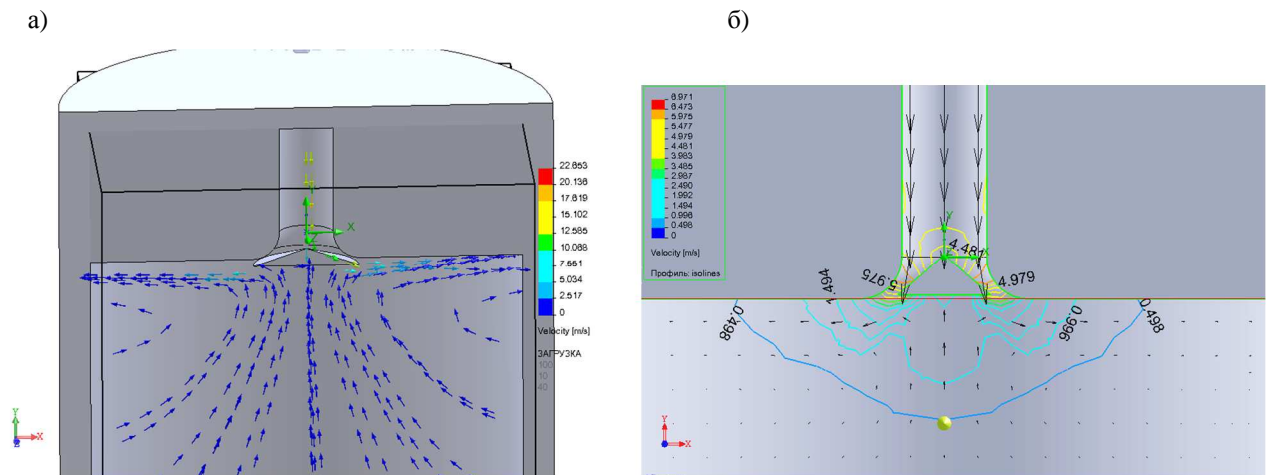


Рисунок 3.13. Линии тока и векторное поле скоростей воздуха, полученные при $V_{вх}=5$ м/с: а) в эксперименте №5; б) в эксперименте №7.

Соответственно, чем выше составляющая скорости на ось X, тем устойчивее налипание струи. В тоже время, увеличение скорости воздуха во входном патрубке до 15 м/с и выше, приводит к увеличению проекции скорости V_{med} и V_{max} на ось X, налипание струи в экспериментах 9 и 11, не происходит, имеющееся соотношение конструктивных параметров не обеспечивает формирование условий для проявления эффекта Коанда. В экспериментах 1,4, 5, 7, 10, 13, данный эффект сохранил свое проявление при скорости во входном патрубке 15 м/с и 25 м/с (рисунок 3.14).

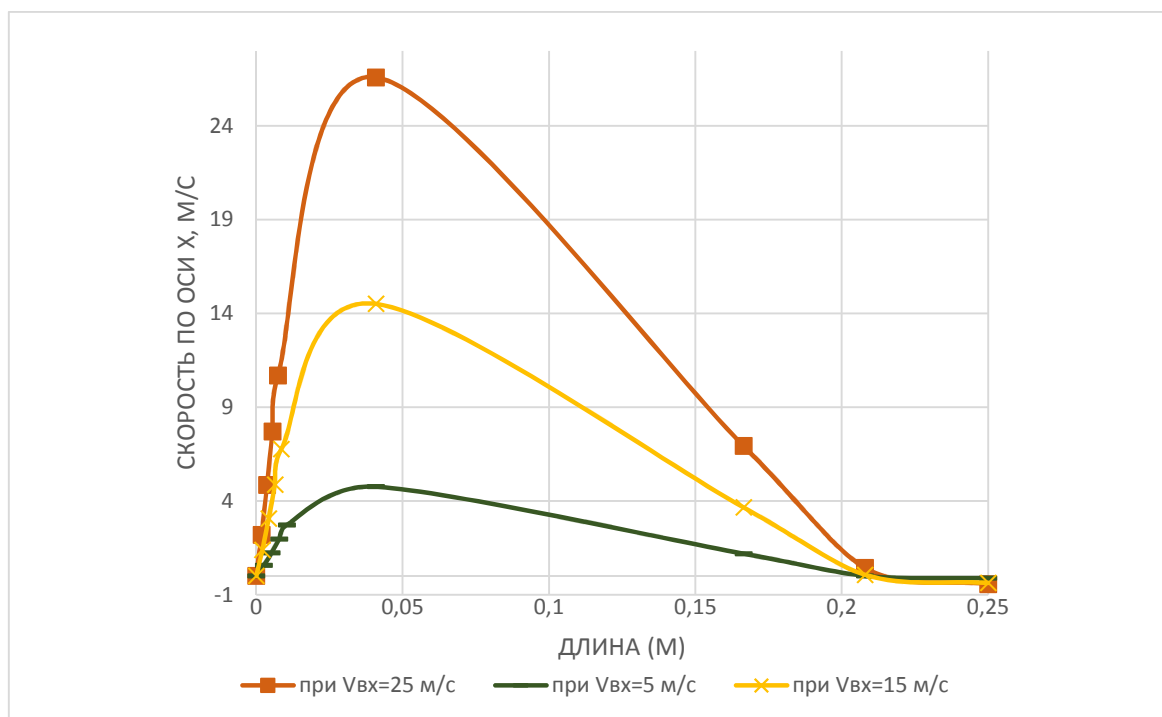


Рисунок 3.14. Профили скоростей в измеряемой линии в эксперименте №4 при различных $V_{вх}$

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

3.4. Рациональные конструктивно-режимные параметры устройства

Для выявления рационального соотношения конструктивно-режимных параметров обеспечивающего создание эффекта Коанда, получены уравнения регрессии (3.9) – (3.14).

При скорости $V_{вх}=5$ м/с

Предсказ. уравнение для V_{med} :

$$\begin{aligned} V_{\text{med}} = & -0,2576 + 0,42235 \cdot (R_1/R_2) + 0,60082 \cdot (\beta'/\beta) + 0,01460 \cdot \gamma \\ & - 1,139 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,0163 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,0709 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma \\ & + 0,10182 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Предсказ. уравнение для V_{max} :

$$\begin{aligned} V_{\text{max}} = & -0,0713 + 0,43151 \cdot (R_1/R_2) + 1,7860 \cdot (\beta'/\beta) + 0,03714 \cdot \gamma \\ & - 3,474 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,0479 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,2135 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma \\ & + 3,1583 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \end{aligned} \quad (3.10)$$

При скорости $V_{\text{вх}} = 15$ м/с

Предсказ. уравнение для V_{med} :

$$\begin{aligned} V_{\text{med}} = & -0,3388 + 0,65404 \cdot (R_1/R_2) + 0,87675 \cdot (\beta'/\beta) + 0,02590 \cdot \gamma \\ & - 2,054 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,0261 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,1680 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma \\ & + 0,24601 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Предсказ. уравнение для V_{max} :

$$\begin{aligned} V_{\text{max}} = & 0,16692 + 0,73182 \cdot (R_1/R_2) + 4,4479 \cdot (\beta'/\beta) + 0,09785 \cdot \gamma \\ & - 9,111 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,1276 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,6029 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma \\ & + 0,90616 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \end{aligned} \quad (3.12)$$

При скорости $V_{\text{вх}} = 25$ м/с

Предсказ. уравнение для V_{med} :

$$\begin{aligned} V_{\text{max}} = & 0,16692 + 0,73182 \cdot (R_1/R_2) + 4,4479 \cdot (\beta'/\beta) + 0,09785 \cdot \gamma \\ & - 9,111 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,1276 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,6029 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma \\ & + 0,90616 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Предсказ. уравнение для V_{max} :

$$\begin{aligned} "V_{\text{max}}" = & 0,29225 + 1,3098 \cdot (R_1/R_2) + 10,575 \cdot (\beta'/\beta) + 0,22003 \cdot \gamma \\ & - 19,90 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,2842 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 1,233 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma \\ & + 1,8095 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Полученные регрессионные уравнения имеют приемлемый уровень значимости, коэффициент детерминации составляет 0,78 (см. таблицу 3.5). На рисунке 3.15 представлен график наблюдаемых и предсказанных значений.

Таблица 3.5

Ведомость расчета коэффициента детерминации

	V_{med}	V_{max}		V_{med}	V_{max}
Множест. - R	0,94	0,94	MS - Модель	0,29	2,57
Множест. - R2	0,88	0,89	SS - Остаток	0,27	2,29
Скоррект - R2	0,78	0,79	сс - Остаток	8	8
SS - Модель	2,06	17,96	MS - Остаток	0,034	0,286
сс - Модель	7	7	F	8,61	8,97
			p	0,003	0,003

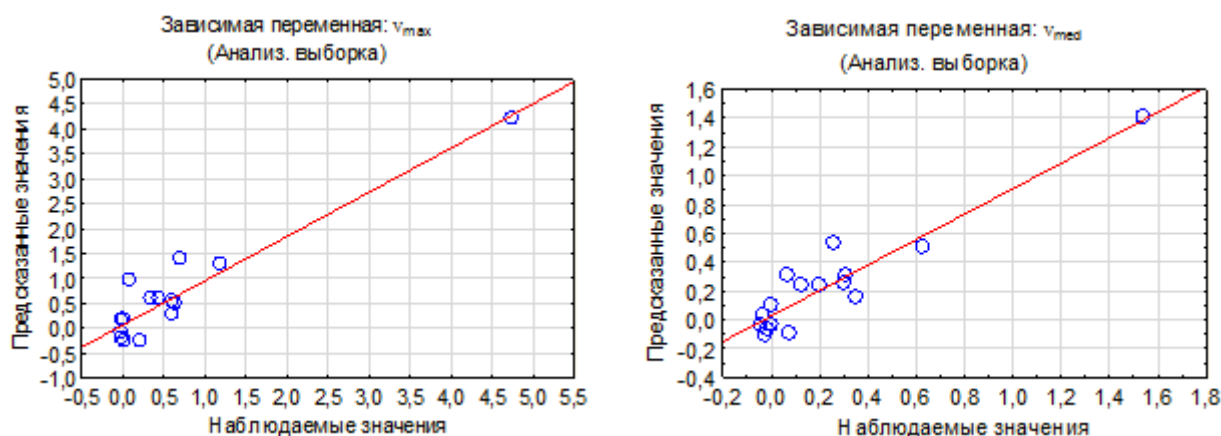


Рисунок 3.15. Графики наблюдаемых и предсказанных значений
проекции скоростей V_{max} и V_{med} на ось X

На основании полученных регрессионных уравнений были построены графики функции желательности (рисунок 3.15), соответствующие предсказанным значениям каждой зависимой переменной. На графике функции желательности отображена желательность отклика (V_{max} или V_{med}), лежащая в интервале от 0 до 1 вместе с наблюдаемыми диапазонами для каждой зависимой переменной. Данный график построен для общей желательности на каждом уровне каждого фактора (R_1/R_2 , β'/β , γ), при этом другие факторы зафиксированы в текущих уровнях. Проанализировав профили (рисунок 3.16), совместно с контурами желательности (рисунок 3.17) можно определить рациональное соотношение конструктивных параметров, для получения желаемого значения отклика.

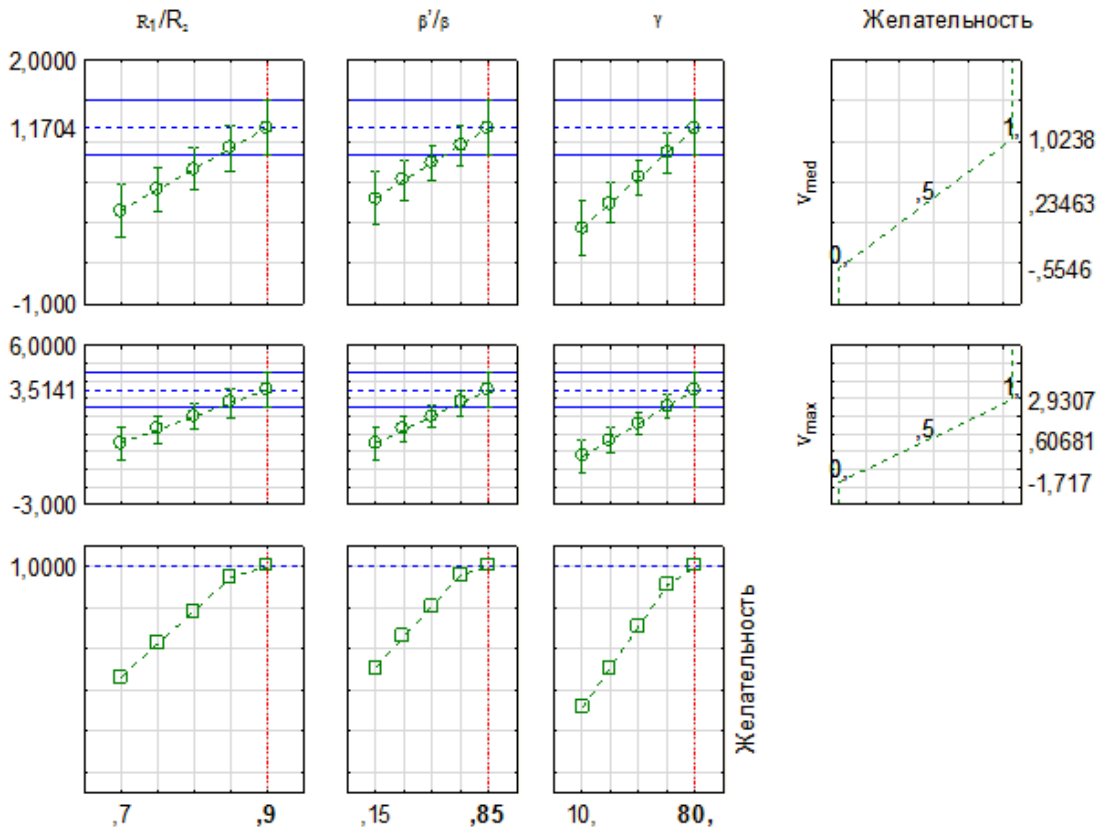


Рисунок 3.16. Профиль для предсказанных значений и желательности проекции скоростей V_{max} и V_{med} на ось X (при $V_{вх} = 5$ м/с)

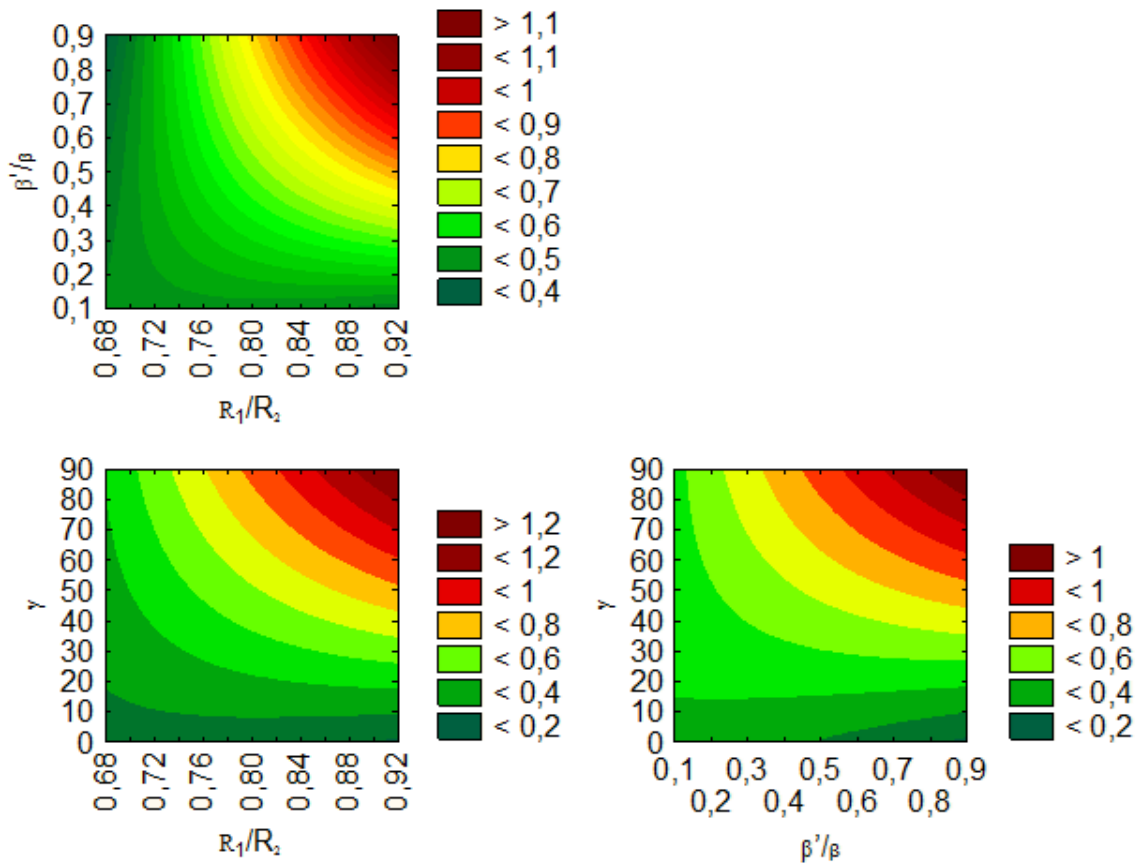


Рисунок 3.17. Контуры желательности, полученные методом квадратичной подгонки

В нашем случае желаемым значением отклика является максимальное значение V_{\max} и V_{med} , так как именно в этом случае налипание струи проявляется наиболее характерно. При этом функция желательности определялась при следующих диапазонах исследуемых факторов: $R_1/R_2=0,7\dots0,9$; $\beta'/\beta=0,15\dots0,85$; $\gamma=10\dots80$. Данные диапазоны выбраны исходя из технологических соображений.

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

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

Полученные уравнения могут использоваться в дальнейшем для оптимизации работы предлагаемого загрузочного устройства в условиях производства.

3.5. Выводы к главе 3

1. На уровне полезной модели разработана и запатентована оригинальная конструкция загрузочного узла бункера, в аэродинамическую схему которого заложено формирование коандовских течений, что обеспечивает исключение взметывания складированного материала.

2. Определены цели и задачи экспериментальных исследований условий реализации эффекта Коанда на разрабатываемом устройстве. В качестве плана принят ЦКОП трехфакторного эксперимента.

3. Разработана и изготовлена лабораторная установка, подобрана методика проведения эксперимента.

4. Установлена хорошая сходимость результатов вычислительных и лабораторных экспериментов: сравнение средних значений скорости с расчетами показывает высокую степень их связи. Коэффициент корреляции Пирсона равен

$0,998 \pm 0,0029$. Достоверность расчетов подтверждаются критерием Стьюдента равным $0,024$, адекватность расчетов подтверждается критерием Фишера равным $1,47$.

5. Согласно результатам эксперимента исходя от геометрических характеристик устройства, выделены три типа поведения воздушной струи: налипающая на верхнюю стенку, наклонная и направленная вертикально вниз.

6. На налипание струи (возникновение эффекта Коанда) особое влияние оказывает малый размер щели между разделителем (конусом) и обтекателем (тором) потока, положение конуса, обеспечивающее наилучшее подтекание воздуха к конусу снизу.

7. В качестве рациональных конструктивных параметров, для проявления эффекта Коанда приняты следующие значения: $R_1/R_2=0,9$; $\beta'/\beta=0,85$; $\gamma=80^\circ$, при этом данный эффект сохранил свое проявление при скоростях во входном патрубке в $5, 15$ и 25 м/с.

8. Для выявления рационального соотношения конструктивно-режимных параметров обеспечивающего создание эффекта Коанда, получены уравнения регрессии, позволяющие определять скорости воздушного потока на некотором расстоянии от загрузочного патрубка, исходя из выбранных геометрических характеристик. Полученные регрессионные уравнения имеют приемлемый уровень значимости, коэффициент детерминации составляет $0,78$.

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Рекомендуемые схемы систем вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов

4.1.1. Техническое описание предлагаемых систем вентиляции

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования являются основой для предлагаемого способа аспирации бункеров при их пневмотранспортной загрузке.

В результате аналитического обзора исследований условий пылеобразования, технических решений и методик расчета систем обеспыливающей вентиляции бункеров определены недостатки существующих способов аспирации. Предложен способ повышения эффективности систем вентиляции, обеспечивающий снижение концентрации пылевых частиц в вентиляционных выбросах от бункеров, загружаемых порошкообразными материалами. Это достигается за счет совершенствования конструкции узла пневмотранспортной загрузки бункеров порошкообразными материалами.

Включение в аэродинамическую схему загрузочного узла бункера эффекта Коанда, заключающегося в изменении направления воздушных струй, движущихся вдоль криволинейной поверхности, обеспечивает снижение действие одного из главных факторов пылеобразования: контакт пневмотранспортной струи с поверхностью хранящегося в бункере материала.

Указанное повышение эффективности систем вентиляции достигается тем, что в способе аспирации загружаемого пневмотранспортом склада сыпучих материалов, заключающемся в том, что запыленный воздух, образующийся при перегрузке сыпучего материала, направляется в полости соседних бункеров к месту отвода, транспортируется к обеспыливающей установке, подвергается инерционному сепарированию по эффекту Коанда, в результате чего твердая фаза оседает в полости бункера, а очищенная газовая фаза продолжает движение не соприкасаясь с материалом, хранящимся в бункере, не взметывая его.

На рисунке 4.1 показан склад готовой продукции цементного завода при

линейной компоновке бункеров. Бункера оснащены системами пневмотранспорта для загрузки и выгрузки материала, а также системами аэрации и вентиляции.

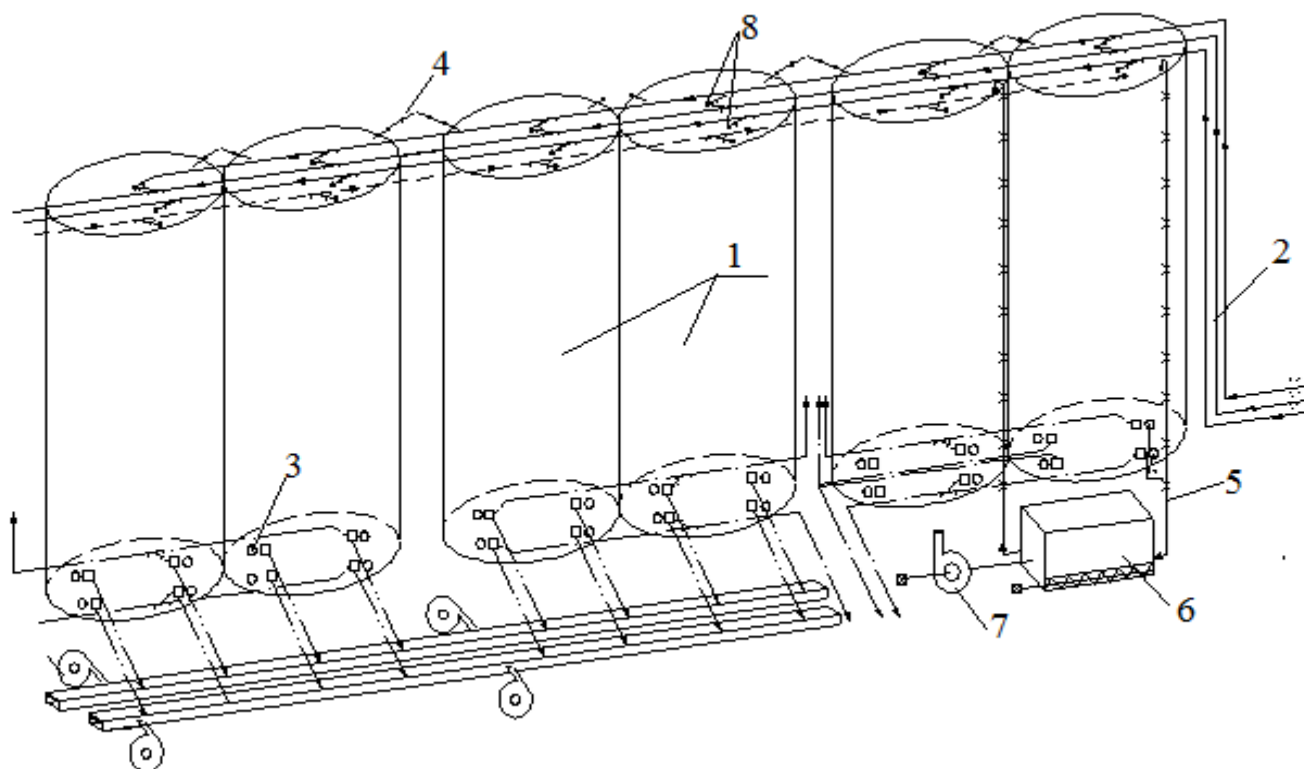


Рисунок 4.1. Склад сыпучих материалов, при линейной компоновке бункеров: 1 – бункер, 2 – трубопроводы системы пневмотранспорта, 3 – элементы системы аэрации, 4 – переточные каналы, 5 – аспирационный воздуховод, 6 – рукавный фильтр, 7 – вентилятор, 8 – загрузочное отверстие

Данный склад сыпучих материалов (рисунок 4.1) включает несколько бункеров. Важным элементом системы вентиляции являются Л-образные переточные каналы, которые прикреплены фланцевым соединением к бункерам, что позволяет объединять полости соседствующих бункеров. Воздухозаборный трубопровод входным патрубком неподвижно закреплен на крышке бункера, а выходным патрубком – с входным патрубком вытяжного вентилятора, выходной патрубком которого сообщен с обеспыливающей установкой. Предлагаемое устройство для снижения пылеобразования устанавливается в загрузочное отверстие бункера.

Система аспирации загружаемого пневмотранспортом склада сыпучих материалов работает следующим образом.

При загрузке одного из бункеров пылевоздушная смесь поступает в его полость через загрузочный патрубок, соединенный с трубопроводом

пневмотранспорта. При выходе трубопровода системы пневмотранспорта поток натекает на обтекатель Коанда в результате чего происходит инерционное сепарирование: согласно эффекту Коанда газовая составляющая «налипает» на поверхность обтекателя Коанда, а пылевые частицы по инерции осаждаются в полости бункера. Затем запыленный воздух направляется к воздухозаборному трубопроводу, при этом возможны перетоки через Л-образные переточные каналы, до бункера, из которого производится удаление запыленного воздуха воздухозаборным трубопроводом. В следствии работы вытяжного вентилятора запыленный воздух транспортируется от воздухозаборного трубопровода к обеспыливающей установке.

Конструкция сопла, ограниченного тором и конусом обеспечивает не только снижение уноса частиц системой пылеочистки, но и уменьшение «раздувания» и пылеобразования загруженного материала. Однако при промышленной апробации были обнаружены некоторые недостатки, связанные с монтажом и эксплуатацией устройства. Поэтому дальнейшая разработка устройства направлена на упрощение монтажа и сервисного обслуживания устройства.

Указанный результат достигается тем, что устройство, содержащее обтекатель и разделитель потока, согласно предлагаемому решению дополнительно содержит короб. В предлагаемом решении короб состоит из верхней и нижней части, соединенных с возможностью перемещения и фиксации в промежуточных положениях и крышки с патрубком для подачи пылегазовой смеси.

Благодаря тому, что устройство содержит короб, состоящий из телескопически соединенных частей упрощается монтаж и сервисное обслуживание.

Устройство (рисунок 4.2) состоит из короба, образованного верхней 1 и нижней 2 частью, например, трубами различного диаметра, соединенными между собой подвижным соединением для обеспечения возможности перемещения верхней части и фиксации в промежуточных положениях, например, телескопическим и крышки 3, которая неподвижно прикреплена к верхней части короба. К крышке, прикреплен патрубок 4 для подачи пылевоздушной смеси, а также прикреплен стержень 5, ко второму концу которого прикреплен разделитель потока 6. К

нижней кромке нижней 2 части короба прикреплен обтекатель 7, выполненный в виде тела вращения.

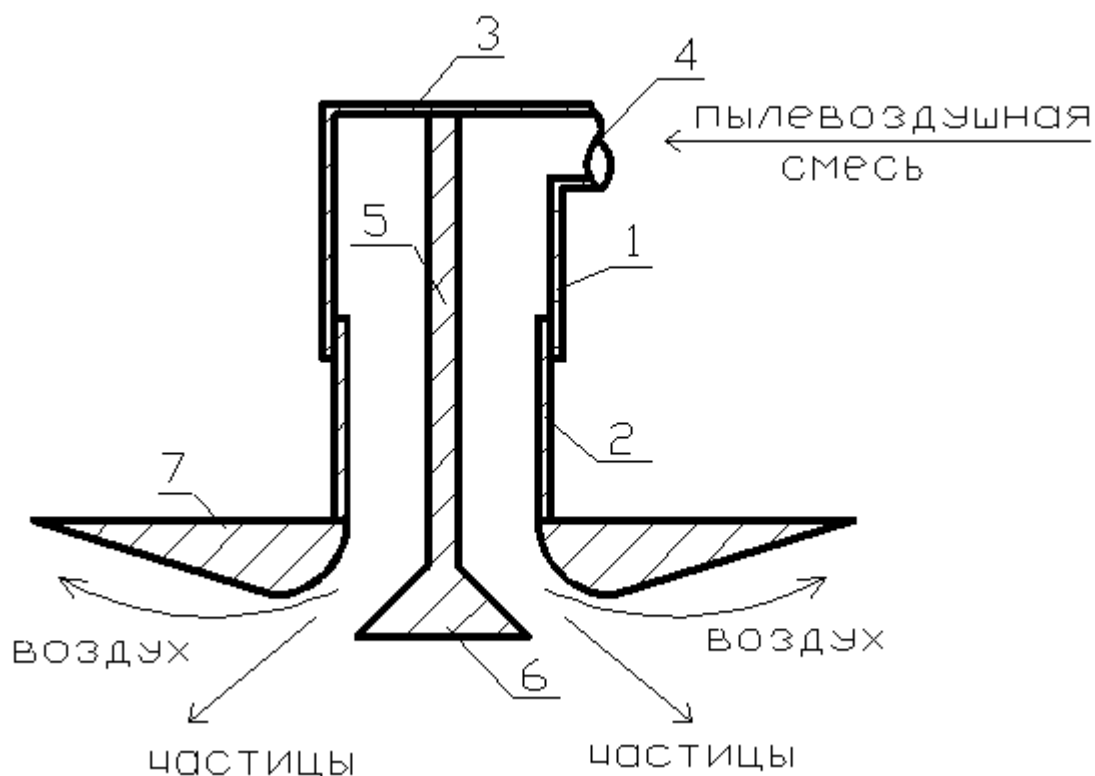


Рисунок 4.2. Модернизированное устройство для снижения пылеобразования при загрузке порошкообразных материалов

Устройство работает следующим образом.

Предварительно устройство монтируется в загрузочный проем бункера. При этом крышка посредством патрубка для подачи пылевоздушной смеси соединяется с трубопроводом системы пневмотранспорта. Затем осуществляется настройка устройства: путем вертикального перемещения нижней части короба, вместе с закрепленным на ней обтекателем относительно неподвижных крышки, верхней части, стержня и разделителя потока. Исходя из расхода воздуха, а также вида, плотности и крупности сыпучего материала выбирается оптимальная величина зазора между обтекателем и разделителем потока, обеспечивающая наибольший угол отклонения потока при исключении возможности забивания сыпучим материалом данного зазора. При движении в полости короба пылегазовая смесь попадает в зазор между обтекателем и разделителем потока. Сыпучий материал под действием сил инерции перемещается к разделителю потока, что обеспечивает его

смещение в периферийную зону потока, облегчая выход частиц из струи. Струя воздуха, вытекая из зазора между обтекателем и разделителем потока с высокой скоростью, увлекает окружающий воздух, но поверхность обтекателя препятствует свободному поступлению воздуха с одной стороны струи, способствуя понижению давления у поверхности обтекателя и «прилипанию» к ней струи воздуха. Таким образом, поток сыпучего материала движется в место складирования, а поток газа разворачивается согласно эффекту Коанда и отводится с помощью устройства для отвода газа.

Однако, при выходе воздушного потока из переточного канала возможно вторичное взметывание материала, находящегося в бункере. Для снижения запыленности аспирационного воздуха необходимо устранить возможность возникновения данного явления. Поставленная цель достигается также тем, что в системе аспирации загружаемого пневмотранспортом склада сыпучих материалов содержащая Л-образные переточные каналы, попарно соединяющие полости рядом стоящих бункеров, воздухозаборный трубопровод, входной патрубок которого соединен с одним из бункеров, а выходной - с входным патрубком вытяжного вентилятора, выходной патрубок которого сообщен с обеспыливающей установкой дополнительно содержит обтекатель Коанда, устанавливаемый на выходе из переточного канала.

Оснащение воздухозаборными трубопроводами двух бункеров и дополнение системы аспирации элементом переключения обеспечит исключение снижения эффективности работы системы при загрузке бункера, из которого осуществляется удаление воздуха воздухозаборными трубопроводами.

При групповом размещении бункеров (рисунок 4.3), оснащенных воздухозаборными трубопроводами двух бункеров каждый из них входным патрубком закрепляют на крышке бункера, а выходным патрубком – с элементом переключения, в качестве которого может быть применен двухходовой переключатель с дистанционным управлением, третий патрубок которого соединяют с входным патрубком вытяжного вентилятора.

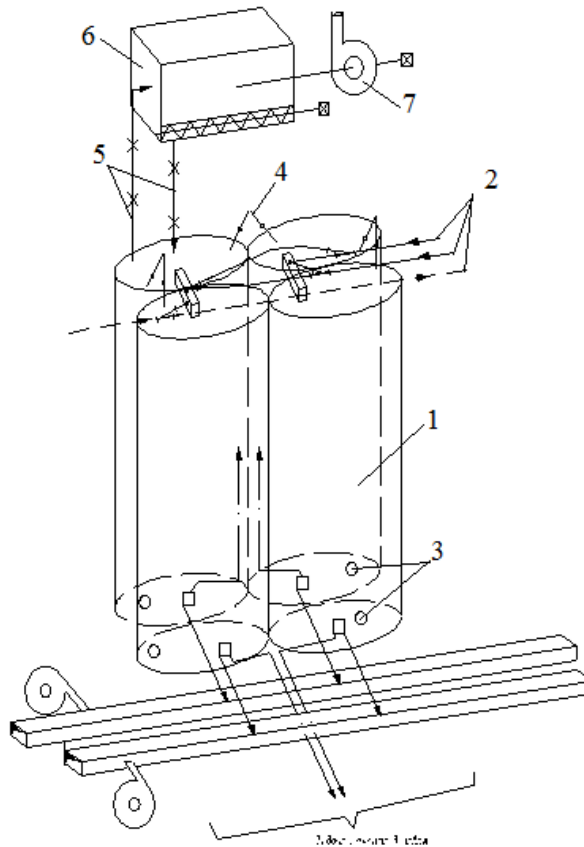


Рисунок 4.3. Склад сыпучих материалов, при групповой компоновке бункеров: 1 – бункер, 2 – трубопроводы системы пневмотранспорта, 3 – элементы системы аэрации, 4 – переточные каналы, 5 – аспирационный воздуховод, 6 – рукавный фильтр, 7 – вентилятор

При оснащении воздухозаборными трубопроводами двух бункеров с помощью элемента переключения к месту отвода, при перетоке в полость следующего бункера запыленный воздух подвергается инерционному сепарированию по эффекту Коанда, в результате чего твердая фаза оседает в полости бункера, а очищенная газовая фаза продолжает движение не соприкасаясь с материалом, хранящимся в бункере, таким образом, не взметывая его, транспортируется к обеспыливающей установке, очищается.

4.1.2. Методика расчета предлагаемых систем вентиляции

С учетом предложенных конструктивных особенностей необходимо уточнить методику расчета аспирационной сети, заключающаяся в следующих последовательных стадиях расчета: определение массовой концентрации перемещаемой смеси; определение диаметров воздуховодов в ответвлениях и

уточнение скоростей движения воздуха; определение потерь давления на участках и их увязка; уточнение массовой концентрации смеси и определение потерь давления в сети; определение потерь давления в коллекторе и в узле; расчет пылеулавливающего аппарата; подбор вентилятора и электродвигателя к нему; уточнение потерь давления в сети с учетом вентилятора; расчет материального баланса процесса пылеулавливания.

Таким образом, с учетом включения устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов в конструкцию узла пневмотранспортной загрузки бункера необходимы уточнения при определении массовой концентрации перемещаемой смеси. Для этого определяются составляющие скорости воздушного потока по формулам (2.68), (2.72), (2.77), (2.91), (2.135) в зависимости от типа воздушной струи, формируемой в загрузочном узле. Определение концентрации и дисперсного состава взмываемой пыли необходимо установить по известным зависимостям [28, 30, 33, 37] условий взаимодействия потока загружаемого материала с преградой.

В зависимости от геометрических характеристик бункера, расхода загружаемого материала и предварительных значений концентрации и дисперсного состава взмываемой пыли определяются рациональные конструктивно-эксплуатационные параметры устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов. Рекомендуется выбирать характеристики, обеспечивающие прилипание воздушной струи к крышке бункера согласно эффекту Коанда в соответствии с результатами экспериментальных исследований, представленных в таблице 3.4 и рисунке 3.9.

Для окончательного расчета концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе необходимо оценить осаждение материала при движении его в полости бункеров. При значительных размерах бункеров и сообщении их переточными каналами рекомендуется учитывать силы инерционного пылеосаждения. По формуле, предложенной Падва В. Ю. [96], определяется значение парциальных степеней очистки для выходного сечения из группы бункеров (в данном случае работающих, как пылеосадительная камера):

$$\eta_n = 100 \left[1 - \frac{1}{i} \sum_o^i n \right], \quad (4.1)$$

где i – число точек расчета концентрации частиц; n – отношение концентраций частиц определенного диаметра в расчетной точке на выходе к их концентрации во входном сечении.

Величина n определяется из уравнения

$$n = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1, \quad (4.2)$$

где $\Phi(x)$ – интеграл вероятности.

Значения x_1 и x_2 определяются по формулам:

$$x_1 = \frac{1 + \frac{h}{H} - \frac{L}{H} (w_u/w_z)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}; \quad (4.3)$$

$$x_2 = \frac{1 - \frac{h}{H} + \frac{L}{H} (w_u/w_z)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}, \quad (4.4)$$

где h – расстояние от крышки бункера до поверхности складированного материала, w_u – скорость витания частиц того размера, для которого определяется значение η_n .

Для расчета скорости осаждения частиц пыли определяется вязкость среды $\mu_{см}$, Па·с. Вязкость компонентов, входящих в состав аспирационного воздуха, при рабочих условиях:

$$\mu_i = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}, \quad (4.5)$$

где μ_0 – вязкость газа при 0 °С, C – постоянная Сезерленда.

Определяется скорость осаждения (седиментации) частиц пыли крупнее заданного размера под действием силы тяжести, м/с:

$$\omega_s = \frac{d_u^2 \rho_u g}{18 \mu_{см}}. \quad (4.6)$$

Поскольку геометрические характеристики бункера известны, то

рассчитываются фракционная и общая степени очистки. Для чего уточняется скорость газового потока в сечении камеры, м/с:

$$\omega_z = \frac{Q}{H \cdot B}. \quad (4.7)$$

Для более полного осаждения пыли скорость движения газа в них должна быть небольшой (не более 3 м/с), для эффективного осаждения пылевых частиц также подбираются геометрические характеристики устройства для снижения пылеобразования уравнениям регрессии (3.9) – (3.14).

Находится относительная скорость частиц, осаждаемых в бункере с эффективностью 50 %:

$$\left(\frac{\omega_{\text{ч}}}{\omega_z} \right) \cong 1,5 \frac{H}{L}; \quad (4.8)$$

$$(\omega_{\text{ч}})_{50} = 1,5 \frac{H}{L} \omega_z. \quad (4.9)$$

По номограмме для определения скорости витания частиц находится при данной плотности частиц диаметр частиц, улавливаемых с эффективностью 50 % – d_{50} .

Для определения зависимости $\eta_n = f(d_{\text{ч}})$ выбираются дополнительные значения $\omega_{\text{ч}}'$ и $\omega_{\text{ч}}''$ из соотношения

$$\frac{\omega_{\text{ч}}'}{\omega_z} < \frac{\omega_{\text{ч}}}{\omega_z} < \frac{\omega_{\text{ч}}''}{\omega_z}. \quad (4.10)$$

Этим значениям относительных скоростей витания $\omega_{\text{ч}}'$ и $\omega_{\text{ч}}''$ соответствуют диаметры частиц $d_{\text{ч}}'$ и $d_{\text{ч}}''$.

Среднее количество пылевых частиц в выходном сечении можно определить, как среднюю из концентраций в характерных точках. Для значений h/H : 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1 и рассчитываются значения x_1 , x_2 , $\Phi(x_1)$, $\Phi(x_2)$, и для двух величин относительных скоростей частиц $\omega_{\text{ч}}'/\omega_z$ и $\omega_{\text{ч}}''/\omega_z$. По полученным величинам n определяются их средние значения $n_{\text{ср}}'$ и $n_{\text{ср}}''$ и величины:

$$\eta_n' = 100(1 - \eta_{\text{ср}}') \text{ для } d_{\text{ч}}' \quad (4.11)$$

$$\eta_n'' = 100(1 - \eta_{cp}'') \text{ для } d_{ч}'' \text{.} \quad (4.12)$$

В результате расчета получены три значения парциальных степеней очистки газа: $\eta_{ч}'$, η_{50} , $\eta_{ч}''$.

Общая степень очистки:

$$\eta = \sum \eta_n \frac{N_{ex}}{100} \Delta d_{ч} \text{.} \quad (4.13)$$

Или

$$\eta = \sum \eta_{\phi} \frac{\Phi_{ex}}{100} \text{.} \quad (4.14)$$

Данный расчет рекомендуется в качестве инженерного, более точные методы расчета, рассмотрены в [69, 161], показывают, что даже при оптимальных условиях степень осаждения частиц размером менее 30 мкм не превышает 50%, и обычно их используют в качестве предварительной ступени очистки. Однако, синергетический эффект применения аэродинамического эффекта Коанда в узле загрузки и организации воздухораспределения для создания условий инерционного осаждения в полости бункеров позволяет обеспечить снижение концентрации пылевых частиц перед обеспыливающим аппаратом, а также снижение запыленности на рабочих местах в цехах и окружающей среде.

4.2. Обеспыливание цементных силосов ЗАО «Белгородский цемент»

4.2.1. Характеристика условий производства

Выходящий из мельницы цемент, по аэрожелобам подается в приемный бункер пневматического насоса. Цемент в виде аэросмеси транспортируется насосом по цементопроводу со скоростью 15-30 м/с, достаточной для того, чтобы цементные зерна удерживались в воздушном потоке. Чтобы переключать подачу цемента в ответвляющийся цементопровод, устанавливается двухходовой переключатель с пневматическим дистанционным управлением. На верху силоса находится распределительный цементопровод, соединенный с питательным цементопроводом. Из него цементная аэросмесь через двухходовые переключатели поступает в патрубки, а затем в силос.

При вылеживании в силосе цемент охлаждается и в нем продолжается процесс гашения свободной извести, если она не полностью погасилась во время нахождения клинкера в клинкерном складе.

При хранении в больших емкостях цемент, особенно если он содержит даже небольшое количество влаги, слеживается и ссыпаясь при разгрузке, часто образует своды. Эти своды затрудняют очистку емкостей и, кроме того, при обрушении могут вызвать аварию.

Поэтому цемент при разгрузке подвергают аэрации, то есть вводят в него воздух. Это полностью исключает возможность образования сводов. Воздух, медленно протекая между зернами цемента придает ему большую подвижность, и аэрированный цемент приобретает текучесть. Помимо гарантии от образования сводов, аэрирование позволяет полностью разгружать силос.

Согласно схеме, принятой на предприятии, один рукавный фильтр обслуживает блок силосов. Характеристика склада хранения цемента приведена в таблице 4.1. Таким образом, на верхней отметке каждого блока железобетонных силосов старого цементного склада установлены рукавные фильтры ФРКН-180 с вентиляторами ВДН-9у. Суммарная производительность двух аспирационных установок составляет $Q=24000$ м³/час, что обеспечивает работу фильтров с удельной газовой нагрузкой 1.0 м³/(м²*мин) (допустимая нагрузка составляет 1.7 м³/(м²*мин)), при загрузке силосов от трех цементных мельниц и одновременной выгрузке из всех восьми силосов. Сброс уловленной пыли осуществляется непосредственно в силос.

На крыше блока новых силосов диаметром 6 м установлен фильтр Е-48 с электроподогревом, производительностью $Q=13500$ м³/час с центробежным вентилятором Pol KNL 520/145к, изготовленные в Германии на заводе «Zementlagenbau Dessau» в 1959 году.

В связи с невозможностью размещения аспирационных установок на верхних отметках металлических силосов старого склада и силосах диаметром 15 м нового, предусмотрены специальные помещения для рукавных фильтров рядом с силосами над железнодорожными вагонами.

Характеристика склада хранения цемента

№ силоса	кол-во часов работы в год	хар-ка источника выброса			хар-ка выбросов			хар-ка установки обеспыл.				выбросы										
		источник выброса	высота источника	диаметр	скорость	объем	температура	тип газоочист. установок	коэф. обесп. газоочист., %	средняя степень очистки	максимал. степень очистки	загрязняющ. в-во	г/с	мг/м ³	т/год	валовый выброс по источнику, т/год						
1-6	8300	труба	21	0,5	9,48	1,86	30	ФРКИ-180	100	98,8	99,5	пыль неорганическая 70-20% SiO ₂ (пыль цемента)	0,41	220,43	11,414	11,414						
7-10	200		21	0,5	14,43	2,831	19	ФРКИ-180	100	95,7	99,5		1,83	646,4	1,3176							
	300		21	0,5	14,43	2,831	19	ФРКИ-180	100	95,7	99,5		1,021	360,65	1,1026							
11-14	6920	труба	21	0,5	13,94	2,736	40	ФРКИ-180	100	98,6	99,5		0,33	120,6	6,265	6,265						
16	3460	труба	20	1	2,41	1,88	28	6 ЦН-15 ФРКИ-180	100	99	99,8		0,505	269,6	3,334	3,334						
17	3360	труба	20	1	3,71	2,94	38	6 ЦН-15 ФРКИ-180	100	99	99,8		0,598	203,4	5,737							
	100																	0,58	197,3	0,1656		

Здесь установлен рукавный фильтр типа ФРКН-360 с вентилятором ВДН-11у1. Производительность такой установки составляет 24000 м³/час, что также обеспечивает работу фильтра с удельной газовой нагрузкой 0.95 м³/(м²*мин) при работе трех мельниц и одновременной выгрузке из шести силосов.

Сбор уловленного цемента осуществляется винтовым конвейером диаметром 320 мм в бункер пневмокамерного насоса ГА-23Б. Транспорт пыли осуществляется по трубопроводу диаметром 150 мм в один из двух цементных силосов блока.

Расчет аспирационных установок и подбор оборудования выполнен с учетом возможности подключения к ним аспирации загрузки железнодорожных вагонов.

4.2.2. Описание предлагаемого решения и результата

Конструкция загрузочного узла модернизирована в соответствии с

разработанным и запатентованным (приложение Е, Ж) устройством для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов. Техническое решение для бункера, входящего в состав одного из четырех силосов приведено на рисунке

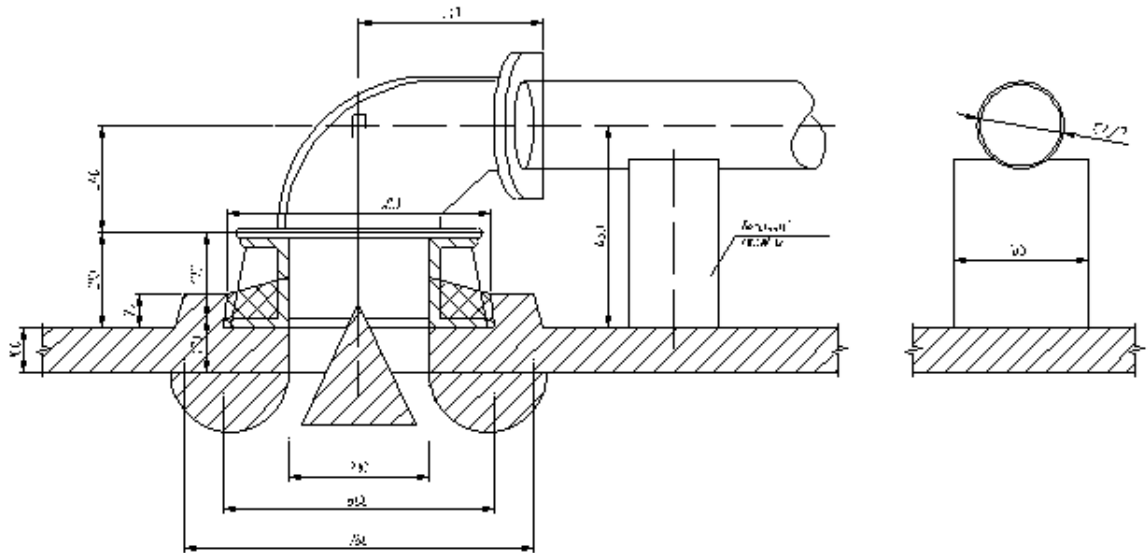


Рисунок 4.4. Конструкция загрузочного узла цементного бункера

Устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих веществ прошло промышленные испытания в условиях загрузки силосного склада цементного завода ЗАО «Белгородский цемент»: акт промышленных испытаний приведен в приложении К, результаты - в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Результаты замеров запыленности воздуха промышленного эксперимента

	температура, С	разрежение, мм. в. ст.	кол-во аспирационного воздуха, м ³ /ч	подсосы, %	запыленность, мг/Нм ³	кол-во пыли в аспирационном воздухе, г/с	степень очистки, %
перед рукавным фильтром	49	64	10527,322	5,05	8998,016	22,202	98,8
после рукавного фильтра	44	108	10840,952		102,713	0,266	
замеры с предлагаемым устройством:							
перед рукавным фильтром	47	63	10625,548	7,09	5886,50	14,660	98,6
после рукавного фильтра	43	109	11002,224		78,019	0,205	

4.2.3. Расчет экономического эффекта от внедрения предлагаемых решений

Модернизация системы пылегазоочистки связана с дополнительными затратами, поэтому необходимо провести технико-экономическое обоснование. Проведем сравнение изменения экономических показателей с учетом прибыли, от реализации пыли материала, оставшейся в бункере.

В качестве основного экономическо-экологического показателя выступает разница между платежами между базовым и предлагаемым вариантами за так называемый экологический ущерб [162]:

$$\Delta Y = Y_{об.баз} - Y_{об}, \quad (4.15)$$

где $Y_{об}$ – плата за загрязнение окружающей среды, руб.

$$Y_{об} = Y_{отх} - Y_{атм}, \quad (4.16)$$

где $Y_{отх}$ – плата за загрязнения твердыми отходами, руб.; $Y_{атм}$ – плата за загрязнения атмосферы выбросами, руб.

Твердые отходы, следует утилизировать: подвергать уничтожению, складированию или захоронению. При этом вероятно вторичное загрязнение. Экологический ущерб определяется по следующей формуле [162]:

$$Y_{отх} = Z_{отх} + Y_{тер} + Y_{атм}^{6m}, \quad (4.17)$$

где $Z_{отх}$ – плата за утилизацию, руб.; $Y_{тер}$ – плата за занимаемый участок территории, руб.; $Y_{атм}^{6m}$ – плата за вторичное загрязнение, руб.

Плата на утилизацию является суммой затрат на транспортировку и обслуживание оборудования [162, 163, 164]

$$Z_{отх} = (Z_{про} + Z_{зр} \cdot l + C_{отх}) \cdot A_{отх} + E_n \cdot K_{сз}, \quad (4.18)$$

где $A_{отх}$ – количество отходов, т/г.

Экономический ущерб от отторжения площади определяется [54]:

$$Y_{тер} = (Z_{зем}^{3.0} + Z_{рек.зем}) \cdot S_{тер}^-, \quad (4.19)$$

где $Z_{зем}^{3.0}$ – экологическая оценка территории, руб./м², для Белгородской области

$Z_{зем}^{э.о} = 0,0174$ руб./м²; $Z_{рек.зем}$ – затраты на рекультивацию, руб./м, для Белгородской области $Z_{рек.зем} = 17,17$ руб./м²; $S_{мер}^-$ – площадь территории, приходящейся на захоронение или складирование отходов, м²:

$$S_{мер}^- = S_{мер} \cdot A_{отх}, \quad (4.20)$$

где $S_{мер}$ – условная площадь территории, приходящаяся на 1т отходов, м².

Величина вторичного загрязнения зависит от количественной и качественной характеристики выбросов, а также от техники их утилизации [165]:

$$Y_{атм}^{вт} = Y_{уд} \cdot \sigma_{зав.возд} \cdot f \cdot \sum A_i^{возд} \cdot H_{отх.возд} \cdot A_{отх}, \quad (4.21)$$

где $Y_{уд}$ – характеристика удельного ущерба от 1 у.т. загрязняющего вещества, руб./у.т., для Центрального района $Y_{уд} = 49,3$ руб./у.т.; $H_{отх.возд}$ – норма поступления загрязняющего вещества, т/т.

При расчете учитывается относительную опасность, которая зависит от вида территории зоны активного загрязнения (ЗАЗ) [166]. Для промышленных узлов показатель относительной опасности составляет $\sigma_{зав.возд} = 30$.

Поправки на характер рассеивания вредных выбросов [163]:

$$f = \frac{100}{100 + \varphi h} \cdot \frac{V}{1 + V}, \quad (4.22)$$

где h – геометрическая высота, м; V – скорость преобладающего направления ветра, м/с; φ – коэффициент учета подъема источника выбросов:

$$\varphi = 1 + \frac{\Delta T}{75}, \quad (4.23)$$

где ΔT – среднее значение разности температур источника и окружающей среды, °С.

Относительная агрессивность вредных веществ вентиляционных выбросов определяется по формуле [163]:

$$A_i^{возд} = a_i \cdot \alpha_i \cdot \delta_i \cdot \lambda_i \cdot \beta_i, \quad (4.24)$$

где a_i - опасность для человека:

$$a_i = \left(\frac{60}{\text{ПДК}_{\text{сум}} \cdot \text{ПДК}_{\text{р.з.}}} \right)^{0,5}, \quad (4.25)$$

α_i - коэффициент накопления вредных веществ и последующего воздействия на человека, $\alpha_i = 1$; δ_i - коэффициент вредного действия $\delta_i = 1$; λ_i - коэффициент, учитывающий вторичное попадание в окружающую среду, $\lambda_i = 1$; β_i - коэффициент учитывающий возможность формирования более опасных загрязнений, $\beta_i = 1$.

Таким образом плата за загрязнение окружающей среды составит [162]:

$$Y_{\text{атм}} = Y_{\text{уд}} \cdot \sigma_{\text{заз.возд}} \cdot f \cdot \sum A_i^{\text{гозд}} \cdot A_{\text{выб}}, \quad (4.26)$$

где $A_{\text{выб}}$ - количество поступающего в воздух, т/год.

Разность удельных затрат за загрязнение модернизированного и базового варианта с учетом прибыли, получаемой от реализации материала, составит годовой эколого-экономический эффект [162]:

$$\mathcal{E}_2 = Z_{\text{баз}}^2 - Z^2 + \Pi. \quad (4.27)$$

Приведенные затраты составят:

$$Z^2 = Z + Y = C_{\text{сз}} + E_{\text{н}} \cdot K_{\text{сз}} + Y_{\text{об}}, \quad (4.28)$$

где $C_{\text{сз}}$ - плата за утилизацию и выброс загрязняющих веществ, руб.:

$$C_{\text{сз}} = C_{\text{сз отх}} + C_{\text{сз выб}}, \quad (4.29)$$

где $C_{\text{сз отх}}$ - плата за утилизацию, руб.; $C_{\text{сз выб}}$ - за выбросы в окружающую среду, руб.

$$C_{\text{сз отх}} = C_{\text{отх}} \cdot A_{\text{отх}}, \quad (4.30)$$

$$C_{\text{сз выб}} = C_{\text{выб}} \cdot A_{\text{выб}}, \quad (4.31)$$

где $A_{\text{выб}}$ - массовая характеристика выброса загрязняющих веществ в атмосферу, т/год.

С учетом [162] и (4.28) расчет эколого-экономического эффекта (4.27)

принимает вид:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_2 &= Y_{об.баз} + C_{сз.баз} + E_n \cdot K_{сз} - (C_{сз} + E_n \cdot K_{сз} + Y_{об}) + \Pi, \\ \mathcal{E}_2 &= C_{сз.баз} - C_{сз} + \Delta Y + \Pi,\end{aligned}\quad (4.32)$$

где Π – прибыль от реализации материала, оставшегося в производстве после модернизации, руб.

$$\Pi = \Pi \cdot A_{ул}, \quad (4.33)$$

где Π – стоимость 1т цемента, руб./т; $A_{ул}$ – количество пылевых частиц, захваченной пылеуловителем, т/год.

К капитальным затратам относятся плата за оборудование, его доставку и монтаж, а также другие расходы, связанные с внедрением проекта:

$$K_{сз} = K_2 + K_3 + K_4, \quad (4.34)$$

где K_2 – стоимость оборудования, руб.; K_3 – стоимость инвентаря, руб.; K_4 – прочие затраты, руб.

Целесообразность капитальных затрат на модернизацию систем пылегазоочистки определяется по показателю абсолютной экономической эффективности капитальных вложений [162]:

$$\mathcal{E}_{сзк} = \frac{\Delta Y - C_{сз}}{K_{сз}}. \quad (4.35)$$

Данный показатель должен превышать значение нормативного показателя, т.е. $\mathcal{E}_{сзк} > 0,15$. Основные показатели данного расчета сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3.

Экономический эффект от внедрения на ЗАО «Белгородский цемент»

Затраты на уничтожение отходов, руб.	25678,18
Экономический ущерб от отторжения площади, руб.	103,472
Ущерб от вторичного загрязнения атмосферы, руб.	39,8724
Ущерб от загрязнения атмосферы, руб	4358,847
Ущерб от неутилизированных отходов, руб.	26267,53
Общий ущерб	30626,37
Предотвращенный ущерб	92343,5
Коэффициент экономической эффективности	0,413
Экономический эффект	222970

4.3. Обеспыливание бункеров цеха водосодержащих эмульсий

4.3.1 Характеристика условий производства

Основными источниками вредных выделений (пылей компонентов сырья) данного цеха являются процессы загрузки сырья в диссольверы приготовления шпаклевок, диссольверы приготовления водосодержащих красок и загрузка сырья в передвижной бункер.

Для локализации пылевых выделений от технологического оборудования емкостного типа (рисунок 4.5) целесообразно использование местных вентиляционных отсосов. Данные технологические операции происходят периодически, время проведения определяется техническим регламентом производства. Суммарное время загрузочных операций значительно меньше времени, затрачиваемого на процесс приготовления продукции, следовательно, приоритетным является локализация пылевых выделений от оборудования во время загрузки сырья. Как следует из технологического регламента, одновременно может производиться загрузка не более чем 4-х единиц оборудования, таким образом, максимальная нагрузка на обеспыливающую систему вентиляции (аспирации) складывается из производительности местных отсосов от узла загрузки мобильного бункера и 3-х диссольверов с максимальным расходом удаляемого воздуха.



Рисунок 4.5. Общий вид запыленного цеха

Локализация пылевых выделений от мест загрузок и перегрузок сыпучего сырья

производится путем устройства полужакрытых отсосов (для диссольверов шпаклевки «ПБ» и узла загрузки мобильного бункера) и отвода воздуха из объемов рабочих емкостей (для диссольверов водосодержащих красок). Объемы аспирации обеспечивает удаление воздуха, поступающего с загружаемым материалом по желобу и поступающего через неплотности, при условии поддержания в месте загрузки требуемого разряжения. Удаление воздуха от каждого источника пыления производится во время загрузки материалом за счет периодического подключения местного отсоса к местной вытяжной системе. Для обеспечения периодического удаления воздуха от аспирационных отсосов каждый из них соединяется отдельной веткой воздуховода с коллектором рукавного фильтра. На каждой ветви устанавливается запорный клапан с приводом, оснащенный концевыми датчиками.

Для удаления других производственных вредностей в цехе (углекислый газ, влажность, температура) предусмотрена общеобменная вытяжная вентиляция. Общеобменная вытяжная вентиляция удаляет воздух из верхней части помещения в осях 4-8 вдоль стены по оси А как из наиболее запыленной части помещения. Вентилятор вытяжной общеобменной вентиляции размещается за пределами обслуживаемого помещения на перекрытии цеха. Объем удаляемого воздуха – 4 000 м³/час.

Подача воздуха в помещение цеха осуществляется в количестве, компенсирующем удаление воздуха общеобменной и местной вытяжной вентиляцией. Подача воздуха осуществляется из верхней зоны помещения в осях 4-8 вдоль стены по оси В направленными струями вниз и по направлению площадки на отм. +2.300. Верхняя раздача воздуха является целесообразной в связи с низким уровнем тепловой напряженности технологического процесса (менее 50 Вт/м³). Подготовка приточного воздуха осуществляется в приточной камере, и заключается в фильтрации воздуха и нагреве его в холодный и переходный периоды года.

Воздуховоды системы общеобменной вентиляции изготавливаются из оцинкованной стали, толщина стали определяется в соответствии с требованиями СП 60.13330.2016. Воздуховоды местной вытяжной вентиляции выполняются из листовой стали толщиной 1,25 мм.

Воздуховоды местной вытяжной вентиляции размещаются в верхней части цеха вдоль выступающих конструкций перекрытия и над проходом вдоль стены по оси В. Воздуховоды общеобменной вентиляции размещаются и закрепляются вдоль стен по оси А для вытяжной системы и по оси В – для приточной системы.

Для управления распределением воздушных потоков в системе аспирации вблизи каждой обслуживаемой установки размещается блок выключателей с сигнализаторами загруженности системы аспирации. Перед загрузкой сырьевых материалов оператор-загрузчик включает соответствующий местный отсос на блоке выключателей. При включении соответствующего местного отсоса вентилятор системы аспирации выходит на соответствующие нагрузке данного отсоса обороты вращения, при включении следующего местного отсоса, в зависимости от его проектной производительности, вентилятор переходит на частоту вращения, обеспечивающую одновременное удаление воздуха от всех включенных отсосов. При достижении системой аспирации максимальной проектной производительности блокируется включение дополнительных отсосов и включается визуальная сигнализация достижения предельной нагрузки.

4.3.2 Описание предлагаемого решения и результатов

Для обеспечения требуемого норматива по концентрации пыли в воздухе рабочей зоны предложено несколько технических решений.

Объем возимого бункера (рисунок 4.6) следует увеличить для того, чтобы конус материала при максимальной загрузке был ниже верхней кромки стенок бункера. Этого можно достичь при сохранении габаритов, сделав его квадратным в сечении. К раме возимого бункера снизу приварить сплошное днище для создания лучшего уплотнения при выгрузке в диссоolver. Загрузочное отверстие на эстакаде (отметка +2,300) снабдить наклонным желобом до отметки верхней кромки возимого бункера. Для снижения взметывания материала обеспечить формирование коандовского течения за счет установки элементов устройства для снижения пылеобразования. Защитную решетку в отверстии опустить. Под загрузочным отверстием установить бункерообразное укрытие с жесткими и гибкими уплотнителями. Укрытие снабдить аспирационным отсосом.

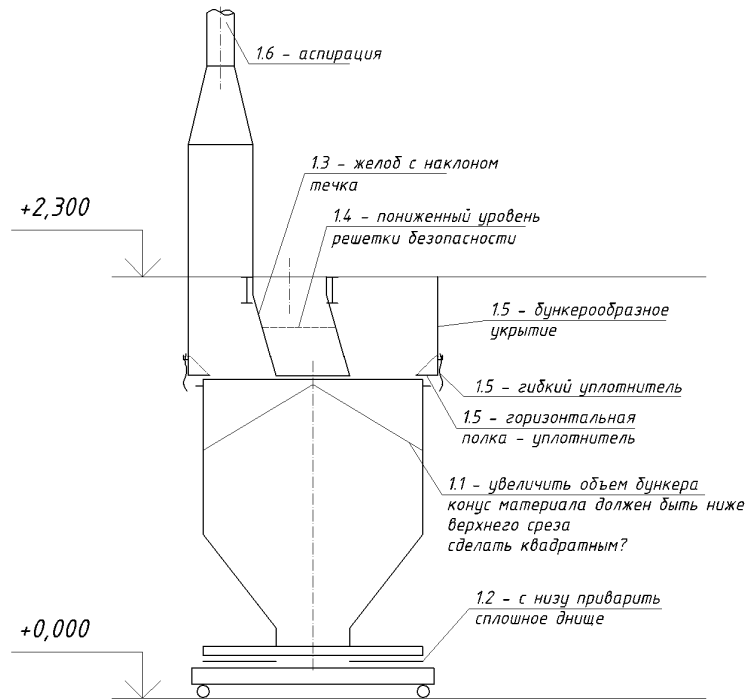


Рисунок 4.6. Мобильный бункер

Для загрузки диссольверов (рисунок 4.7.) для производства красок часть открывающейся крышки заменить аспирационной воронкой, в загрузочный проем установить устройство, формирующее коандовское течение. Диссольверы объединить переточными каналами с наклонными стенками для уменьшения пылевых отложений и лючками для их осмотра и очистки.

При выгрузке возимого бункера закрывать его гибкой или сдвижной крышкой, позволяющей контролировать опорожнение бункера.

Систему аспирационных воздуховодов снабдить автоматическими клапанами, позволяющими производить удаление аспирационного воздуха через преточные каналы из ближайшего соседнего диссольвера с закрытой крышкой.

Расход воздуха, удаляемого системой аспирации, составляет $5760 \text{ м}^3/\text{ч}$ или $1,6 \text{ м}^3/\text{с}$, поэтому допустимая концентрация пыли в выбрасываемом в атмосферу воздухе равна, $\text{г}/\text{м}^3$:

$$A_{\text{kd}} = (160 - 14,4 \cdot Q_n) \cdot k_b \cdot 10^{-3} = (160 - 14,4 \cdot 1,6) \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,14 ,$$

где Q_n - объемный расход выбрасываемого воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; k_b - коэффициент, учитывающий фиброгенную активность пыли, для пылей с ПДКр.з. = $10 \text{ мг}/\text{м}^3$ равен 1.

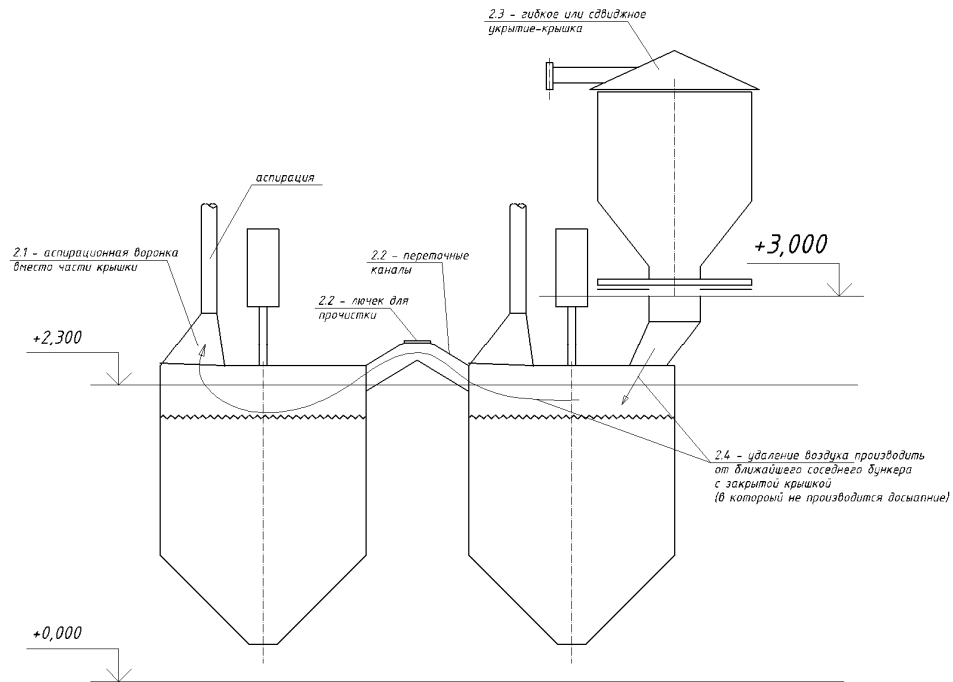


Рисунок 4.7. Система вентиляции диссольтеров

Тогда требуемая степень очистки удаляемого воздуха от пыли перед выбросом в атмосферу составит, %:

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{A_n - A_{\text{kd}}}{A_n} \cdot 100 = \frac{10 - 0,14}{10} \cdot 100 = 98,6 \%$$

Данным требованиям удовлетворяет рукавный фильтр КФЕ-70 с заявляемой производителем степенью очистки не менее 99,8% для частиц пыли более 2 мкм при максимальной остаточной запыленности на выходе из фильтра не более 10 мг/м³.

В системе используются 2-х дюймовые клапана. При срабатывании клапан выбрасывает 200 л сжатого воздуха за импульс; длительность импульса 100-150 мс.; минимальное время между соседними импульсами – 6 сек. Длительность импульса и время между импульсами регулируется при отладке рукавного фильтра.

В настоящее время элементы системы регенерации оптимизированы таким образом, что позволяют обеспечить эффективную работу системы при давлении сжатого воздуха от 0.5 МПа (в частности, оптимизированные геометрические отношения конфузоров каркасных сеток рукавов и импульсных труб).

Установление требуемых расходов воздуха в системах вентиляции

осуществляется регулируемыми клапанами при пусконаладке.

Положительным эффектом от внедрения предложенных систем местной вентиляции для диссольтверов шпаклевки «ПБ» и узла загрузки мобильного бункера является снижение запыленности на рабочих местах непосредственно у указанных аппаратов с 15,59 мг/м³ до 8,48 мг/м³, что подтверждает акт о внедрении (приложение К).

4.3.3 Расчет экономического эффекта

Разработка и внедрение мероприятий для создания безопасных условий труда, направленных на сокращение возникновения профессиональных заболеваний и случаев травматизма, являются обязательными. Такие мероприятия обеспечат снижение экономических потерь от утраченного рабочего дня, особенно в условиях растущих затрат на лечения больного.

Социально-экономический эффект от модернизации системы вентиляции, определяется разностью между снижением материального ущерба и затратами, необходимыми на их введение в деятельность [104]:

$$\mathcal{E}_{om} = \sum M - \frac{\Delta K_e + \Delta K_m - C_n}{T_o} \quad (4.36)$$

где $\sum M$ – снижение ущерба от травматизма и заболеваемости; ΔK_e – затраты на охрану труда; ΔK_m – дополнительные капиталовложения на новые материалы; C_n – затраты на НИР и ОКР, включая авторский надзор; T_o – нормативный срок окупаемости.

Составляющими материального ущерба являются: убыток от травматизма на производстве M_{mp} ; убыток от профессиональных болезней $M_{нб}$; убыток от нетрудоспособности при общей заболеваемости $M_{об}$.

Убыток от временной нетрудоспособности работника $У$, руб. можно рассчитать по формуле:

$$У = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (4.37)$$

где C_1 – потерянный доход; C_2 – пособия, по листкам нетрудоспособности; C_3 – затраты на стационарное лечение; C_4 – затраты на амбулаторное лечение.

Потерянный доход от работника в период нетрудоспособности:

$$C_1 = V_{\text{дн}} \cdot D_3 \quad (4.38)$$

где $V_{\text{дн}}$ – дневная выработка; D_3 – число потерянных дней.

Затраты по листкам нетрудоспособности:

$$C_2 = B_{\text{л}} \cdot D_{\text{н}} \quad (4.39)$$

где $B_{\text{л}}$ – средняя плата по листку нетрудоспособности; $D_{\text{н}}$ – число рабочих дней.

Средства, затраченные на стационарное лечение:

$$C_3 = C_{\text{к}} \cdot D_{\text{сл}}, \quad (4.40)$$

где $C_{\text{к}}$ – средняя стоимость; $D_{\text{сл}}$ – длительность лечения.

Затраты на амбулаторное лечение:

$$C_4 = (P_1 C_{\text{в}} + P_2 C_{\text{д}}) B_{\text{а}}, \quad (4.41)$$

где P_1 – среднее число посещений, приходящееся на один случай потери трудоспособности; $C_{\text{в}}$ – средняя стоимость посещения; P_2 – среднее число обследований; $C_{\text{д}}$ – средняя стоимость одного обследования; $B_{\text{а}}$ – количество больных.

Затраты на амбулаторное лечение можно определить по формуле:

$$A_1 = P_1 C_{\text{в}} + P_2 C_{\text{д}}. \quad (4.42)$$

Социально-экономический эффект составит, руб/год:

$$\mathcal{E} = (V_{\text{дн}} + B_{\text{л}}) D_{\text{э}} - (C_{\text{м}} + C_{\text{т}}), \quad (4.43)$$

где $V_{\text{дн}}$ – средняя выработка; $B_{\text{л}}$ – средняя плата листка нетрудоспособности; $D_{\text{э}}$ – число снижения дней нетрудоспособности; $C_{\text{т}}$ – затраты на модернизацию; $C_{\text{м}}$ – затраты на работу медицинского кабинета.

Сведем расчет социально-экономического эффекта от модернизации систем вентиляции перегрузок порошковых материалов сведем в табл. 4.4.

Социально-экономический эффект от модернизации систем вентиляции

Предотвращенный ущерб, руб.	32569
Лечение в амбулаторных условиях, руб./чел.	7651
Социально-экономический эффект, руб./год	67806

4.4. Выводы к главе 4

1. Разработаны рекомендуемые схемы систем вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов, обеспечивающие снижение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе за счет включения в конструкцию узла пневмотранспортной загрузки устройства для снижения пылеобразования. В результате чего обеспечивается снижение пылеобразования при соударении струи пылящего материала о слой ранее складированного, а также использования в качестве первой ступени очистки полости бункеров, за счет организации воздушных потоков.

2. Уточнена методика расчета систем местной вентиляции бункеров с учетом использования устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов.

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

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

По итогам диссертационного исследования получены следующие результаты.

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

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

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

4. Разработана математическая модель воздушного течения в загрузочном узле бункера в программном комплексе SolidWorks. Путем сравнения натурных и вычислительных экспериментов установлены достоверность и адекватность расчетных полей скоростей, формируемых предложенным устройством для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих веществ. Определены

эффективные режимы работы устройства, обеспечивающие формирование коандовского течения у крышки бункера.

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

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

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

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

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

Благодаря проведенным исследованиям даны практические **рекомендации** по повышению эффективности систем вентиляции при пневмотранспортной загрузке сыпучих материалов, выражающееся в снижении концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе, а соответственно и в вентиляционных выбросах

от бункеров за счет формирования в загрузочном узле коандовских течений.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюшинский И.В., Кононов И.В., Денисов В.В. Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах. Самара: СамГАПС, 2003. 232 с.
2. Нейков О.Д., Логачев И.Н. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков. Москва: Металлургия, 1981. 192 с.
3. Павлов В.Н. Обеспыливающая вентиляция элеваторов и складов. Москва: Колос, 1967. 224 с.
4. Евстифеев В.Н. Трубопроводный транспорт пластинчатых и сыпучих материалов в строительстве. Москва: Стройиздат, 1989. 248 с.
5. Гячев Л.В. Основы теории бункеров. Новосибирск: НГУ, 1992. 148 с.
6. Василевский М.В., Романдин В.И., Зыков Е.Г. Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов: монография. Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2013. 136 с.
7. Кузнецов Ю.М. Пневмотранспорт: теория и практика. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 171 с.
8. Шваб В.А. Аэромеханические методы в технологии производства порошковой продукции. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. 161 с.
9. Барский М.Д., Дроздов Б.С., Павлов В.И. Пневмотранспорт, пылеулавливание и сепарация. Свердловск: Изд-во УПИ, 1979. 95 с.
10. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. Ленинград: Химия, 1984. 104 с.
11. Дуда В.Г. Цемент, электрооборудование, автоматизация, хранение, транспортирование. Справочное пособие. Москва: Стройиздат, 1987. 374 с.
12. Люсов А.Н. Техника и экономика сухого способа производства цемента в СССР и за рубежом. Обзорная информация ВНИИЭСМ, 1971. 69 с.
13. Wirthwein R., Scharf K.F. Betriebserfahrungen mit der Vorcalcinieranlage im Zementwerk Rudersdorf // Zement-Kalk-Gips, Vol. 53, No. 1, 2000. pp. 46-54.
14. Юдин Н.М. Комплексное решение вопросов охраны труда и защиты окружающей среды // Цемент, № 9, 1980. С. 7-8.
15. Коробова О.С., Ткачева А.С. Экологические аспекты цементного

производства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), № 7, 2016. С. 42-46.

16. Классен В.К. Рациональное развитие технологии цемента в России // Технологии бетонов, № 2 (91), 2014. С. 23-25.

17. Сравнительные технико-экономические показатели сухого и мокрого способов производства портландцемента, 06.03-19М.195, 2006.

18. Россошанский В.В. Совершенствование систем обеспыливающей вентиляции в производстве цемента, ГОУВПО "Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет", Волгоград, диссертация. кандидата технических наук : 05.23.03 2007.

19. Гробов А.Б., Артюхин А.С., Азаров Д.В. Расчет фракционной эффективности пылеулавливающего оборудования // Наука і освіта 2005: Екологія. Дніпроперовськ. 2005. Т. 17. С. 12-14.

20. Шевляков В., Филонюк А., Рыбина М., Чернышова В., Кардаш Ф., Эрм И., Буйницкая А.В., Студеничник С. Состояние здоровья работников биотехнологических производств // Вестник ВГМУ, № 3, 2014. С. 127-138.

21. Энтин З.Б., Сивков С.П. Проблемы технического регулирования и охраны окружающей среды при производстве цемента. Часть I. Безопасность цемента и охрана окружающей среды // Цемент и его применение, № 6, 2007. С. 118-122.

22. Остроухих А.В., Вэй П.А., Суркова Н.Е. Анализ современного состояния автоматизации процесса производства сухих строительных смесей // Механизация строительства, № 7 (841), 2014. С. 59-63.

23. Чертов В.Г. Оборудование и процессы мобильных пневмотранспортных установок, Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова, Белгород, автореферат дис.. кандидата технических наук : 05.02.13 2010.

24. Боглаев В.И., Россошанский В.В., Тетерев М.В. Совершенствование систем обеспыливающей вентиляции // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит., № 6 (21), 2006. С. 154-156.

25. Аблакулова Ю.Х., Василевский М.В. Совершенствование систем

транспортировки сыпучих материалов и очистки воздуха в цементном производстве, Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности (ЭБЖ), Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, дипломный проект 2016.

26. Бобровников Н.А. Защита окружающей среды от пыли на транспорте. Москва: Транспорт, 1984.

27. Семенов А.М., Константинов А.Ф. Фильтрация воздуха при ударе струи сыпучего материала о плоскость // В кн.: Проблемы технологии, механизации и автоматизации перегрузочных работ на морском транспорте. Ленинград: Ленморниипроект, 1984. С. 12-15.

28. Ларин Ю.А. Исследование методов борьбы с пылеобразованием при погрузке порошкообразных материалов в трюмы судов, Ленинград, дис. канд. техн. наук: 05.22.19 1973.

29. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации: монография. Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. 659 с.

30. Минко В.А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов. Воронеж: ВГУ, 1981. 175 с.

31. Минко В.А., Логачев И.Н., Логачев К.И., Пузанок А.И., Подпоринов Б.Ф., Овсянников Ю.Г., Минко А.В., Татаренко Н.В., Алифанова А.И. Обеспыливающая вентиляция: монография. Белгород: БГТУ, 2006. 460 с.

32. Минко В.А., Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Шумилов Р.Н., Ильина Т.Н., Староверов С.В., Феоктистов А.Ю., Феоктистов Ю.А., Шаптала В.Г. и др. Обеспыливающая вентиляция. Т. 2. Белгород: БГТУ, 2010. 565 с.

33. Самсонов В.Т. Обеспыливание воздуха в промышленности: методы и средства: монография. Москва: ИНФРА-М, 2016. 234 с.

34. Сервацка З. Отдельные рекомендации по предотвращению пыления массовых сыпучих грузов // Научные труды Морской институт ПНР. 1981. Т. 662. С. 142 - 149.

35. Сухарева А.И. Вентиляция и пневмотранспорт в полиграфии. Москва: Книга, 1971. 30 с.

36. Отделкин Н.С., Отделкин М.С. Прогнозирование пылеобразования при перегрузке пылящих материалов грейферными кранами на основе подобия и моделирования // Научные труды Горьковского института инженерного водного транспорта, Т. 283, № 4, 1999. С. 108-116.

37. Отделкин Н.С. Прогнозирование пылеобразования при различных способах перегрузки пылящих навалочных материалов в морских и речных портах // Вестник Волжская гос. академия водн. трансп. «Надежность и ресурс в машиностроении», Т. 4, 2003. С. 107 — 120.

38. Самсонов В.Т. Об изучении на моделях явления пылеобразования при падении пылящих материалов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, Т. 6, 1964.

39. Степанов А.Л. Портовое перегрузочное оборудование. Москва: Транспорт, 1996. 328 с.

40. Обухов А.М. О распределении энергии в спектре турбулентного потока // «Изв. АН СССР»: Серия географическая и геофизическая, № 4-5, 1941.

41. Hinds W.C. Size characteristics of cigarette smoke // American Industrial Hygiene Association Journal, Vol. 38, No. 1, 1978. pp. 48–54.

42. Vu Duc. Measurements of pollutants emitted during manual arc welding with coated electrodes in an experimental chamber // Staub, Vol. 43, No. 2, 1983. pp. 55–57.

43. Кирпичев М.В. Теория подобия. Москва: Академия наук СССР, 1953. 182 с.

44. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. Москва: Гостехиздат, 1981. 375 с.

45. Веников В.А. О моделировании. Москва: Знание, 1974. 89 с.

46. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. Москва: Наука, 1976. 146 с.

47. Алабужев П.М. Теория подобия и размерности. Москва: Наука, 1968. 146 с.

48. Беннет К.О., Майерс Д.Е. Гидродинамика, теплообмен и массообмен. Москва: Наука, 1985. 726 с.

49. Клайн Д.С. Подобие и приближенные методы. Москва: Мир, 1968. 241 с.

50. Doule K., Szeszynski A. Transportation and handling of Western Canadian

sulphur for the export market // Sulphur, No. 139, 1978. pp. 26 - 31.

51. Meyer F. Crusting agest minimize loss of coal ins transit // Reilway Age, 1982. pp. 26-31.

52. Самсонов В.Т. Об изучении на моделях явления пылеобразования при падении измельченных материалов // В кн.: Научные труды ин-та охраны труда ВЦСПС. Москва: Профиздат, 1974. С. 89-96.

53. Калягин В.А. Меестные вентиляционные устройства составных цехов стекольных заводов. Москва: Профиздат, 195.

54. Сатарин В.И., Перли С.Б. Движение и обеспыливание газов в цементном производстве. Москва: Госстройиздат, 1960. 309 с.

55. Зайончиковский Я. Обеспыливание в промышленности. Москва: Стройиздат, 1969. 350 с.

56. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. Москва: Химия, 1981. 390 с.

57. Банит Ф.Г., Мальгин А.Д. Пылеулавливание и очистка газа в промышленности строительных материалов. Москва: Стройиздат, 1979. 351 с.

58. Алиев Г.М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок. Москва: Металлургия, 1988. 368 с.

59. Балтренаc П.Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов. Москва: Стройиздат, 1990. 182 с.

60. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. Ленинград: Химия, 1990. 288 с.

61. Бутаков С.Е. Аэродинамика систем промышленной вентиляции. Москва: Профиздат, 1949.

62. Вальдберг А.Ю. Технология пылеулавливания. Ленинград: Машиностроение, 1985. 192 с.

63. Гримитлин М.И. Состояние и перспективы очистки промышленных выбросов в атмосферу на машиностроительных предприятиях // Науч. тр. ЛДНТП «Современные способы очистки вредных выбросов в атмосферу». С.Пб. 1991. С. 6-7.

64. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Ленинград: Химия, 1982. 285 с.
65. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. Москва: Стройиздат, 1981. 296 с.
66. Старк С.Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. Москва: Металлургия, 1977. 328 с.
67. Страус В. Промышленная очистка газов. пер. с англ.-е изд. Москва: Химия, 1981. 616 с.
68. Гордон П.М., Пейсахов И.Л. Контроль пылеулавливающих установок. Ленинград: Metallurgizdat, 1956.
69. Василевский М. Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 258 с.
70. Руководящие технические материалы. Пневмотранспорт сыпучих материалов (гранулированных и порошкообразных) взвесью, с поршневой структурой и сплошным потоком материала, МХП СССР, Томск, 1987.
71. Махова О.Г., Пантелеева Н.М. Определение химического и дисперсного составов цементной пыли // Научно-технический сборник. Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, № 60, 2005. С. 119-123.
72. Коломоец М.И., Севриков В.В., Васютенко А.П. Исследование дисперсного состава пыли цементных производств // Вісник СевНТУ. Вип. 106: Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр., 2010. С. 197-202.
73. Трибрат В.В. Обеспыливание аспирационных выбросов дробильных отделений цементных заводов в зернистых фильтрах с импульсной регенерацией, Киев, Автореф. дис.канд.тех.наук 1990.
74. Мазус М.Г., Мальгин А.Д., Моргулис М.Л. Фильтры для улавливания промышленных пылей. Москва: Машиностроение, 1985.
75. Пирумов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. Москва: Госстройиздат, 1961.
76. Данюшевский СИ, редактор. Справочник по проектированию цементных заводов. Ленинград: Изд-во литературы по строительству, 1969. 237 с.
77. Крашенинников Н. Проектирование цементных и асбестоцементных

заводов. Москва. 1966.

78. Ведомственные нормы технологического проектирования цементных заводов, Концерн «Цемент», СПб, ВНТП-06-91, 1991.

79. Зубарева О.Н. Разработка струйно-инерционных пылеуловителей для предприятий стройиндустрии, Нижний Новгород, автореферат дис.. кандидата технических наук : 05.23.03 1995.

80. Голованова Л.В. Общая технология цемента. Москва: Стройиздат, 1984. 118 с.

81. Слюсаренко В.Г., Исаев В.П., Лапшин А.Е., Гацкий А.К. Хранилище для сыпучих материалов с пневмотранспортной загрузкой, Патент РФ 2046963, Oct 04, 1991.

82. Горюшинский И.В. Эффективное заполнение емкостей в транспортно-технологических системах. Самара: СамГАПС, 2008. 138 с.

83. Мосина Н.Н. Совершенствование загрузки хранилищ и подвижного состава сыпучими грузами (на примере зерновых грузов и продуктов помола), С. Петербург-Пушкин, Дисс..канд. техн. наук. 2004.

84. Красников В.В. Подъемно-транспортные машины. Москва: Колос, 1981. 263 с.

85. Шевандина В.М. Разработать технологию бестарной отгрузки, транспортировки железнодорожным транспортом, приема и складирования премиксов, ВНИИКП, Воронеж, Отчет о НИР (заключ.) ГР 0189000830; Инв. №02900054441, 1990.

86. Боумане Г. Эффективная обработка и хранение зерна. Перевод с английского В.И. Дашевского-е изд. Москва: Агропромиздат, 1991. 608 с.

87. Обермейстер АМ, редактор. Комплексная механизация погрузо-разгрузочных работ на транспорте. Москва: Транспорт, 1977. 17 с.

88. Таймер О.Ф. Аварии железобетонных силосов зерновых элеваторов // Конструирование и технология машиностроения, Т. 91, № 2 серия В, 1969. С. 181.

89. Кузьменко В.Н. Выбор конструктивной схемы кузова вагона для перевозки порошкообразных грузов и оценка напряженного состояния его

основных элементов, Москва, Автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. : 05.05.01 1982.

90. Морозов В.Г., Горбачев А.В., Дубинчук А.Н., Наремский Н.К. Устройство для перегрузки сыпучего материала, а.с. 1615082 SU, Sep 27, 1987.

91. Феликсов В.М., Федотова Т.В., Лайко М.Ю. Гравитационный спуск, а.с. 1557021 SU, Jul 07, 1988.

92. Устинов Б.С., Устинов Д.Б. Устройство для транспортирования сыпучих материалов, а.с. 1742169 SU, Mar 27, 1989.

93. Семеновский В.И., Родин С.Б., Воробьев В.Н., Великоредчанина Н.С. Устройство для распределения сыпучего материала в бункере, а.с. 1381039 SU, Sep 03, 1986.

94. Завьялов Ю.И. Устройство снижения пылеобразования, Патент РФ 2185316, Jul 24, 2000.

95. Килин П.И. Аспирация бункеров и емкостей при загрузке сыпучих материалов пневмотранспортом // Цветная металлургия, № 2-3, 200. С. 38-40.

96. Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Падва В.Ю., Русанов А.А., Урбах И.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию. Москва: Энергоатомиздат, 1983.

97. Руководство по расчету воздухопроводов из унифицированных деталей АЗ-804. Москва: Госстрой СССР, 1979.

98. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Энергосбережение в аспирации: теоретические предпосылки и рекомендации. М. - Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2013. 504 с.

99. Trancossi M. An Overview of Scientific and Technical Literature on Coanda Effect Applied to Nozzles, SAE Technical Papers 259, 2011.

100. Coanda H. Improvement in Propellers, US Patent 1104963, 1911.

101. Coanda H. Lifting Device Coanda Effect, US Patent 3261162, 1936.

102. Coanda H. Cyclone Separator, US 2796147 A, 1957.

103. Coanda H. Device for Deflecting a Stream of Elastic Fluid Projected into an Elastic Fluid, US Patent 2052869, 1936.

104. Coanda H. Apparatus for Imparting Rapid Speed to a Mass of Fluid, US Patent 2907557.
105. Столер В.Д. Основы организации и расчета вентиляционных процессов, сопровождающихся эффектом Коанда, Уральск. политехн, ин-т им. С. М. Кирова, Свердловск, Деп. в ВИНТИ 16.04.87 № 1317-B87, 1987. 138 с.
106. Хзмалян Д.М. Теория топочных процессов. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
107. Франк А.М. Дискретные модели несжимаемой жидкости. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 224 с.
108. Wille R., Fernholz H. Report on the First European Mechanics Colloquium // Journal of Fluid Mechanics, No. 23, 1965. pp. 801-819.
109. Pascoa J., Trancossi M., Tacchini A., Ilieva G., Madonia M. Acheon Project: A Novel Vectoring Jet Concept // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Houston, Texas, USA. 2012. Vol. Volume 1: Advances in Aerospace Technology. pp. 499-508.
110. Маркович Д.М. Гидродинамическая структура ограниченных струйных течений, Ин-т теорет. и прикладной механики СО РАН, Новосибирск, автореферат дис.. доктора физико-математических наук : 01.02.05 2003.
111. Залманзон Л.А. Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем. Москва: Наука, 1973. 464 с.
112. Шальнев К.К., Чернявский Б.А., Демидов Ю.С. О механизме прилипания струи к стенке струйного усилителя - эффект Коанда // ДАН, Т. 175, № 1, 1967. С. 55-58.
113. Brown F.T. A Combined and Experimental Approach to the Development of Fluid Jet Amplifiers // Trans. ASME, Vol. 86, No. 2, 1964.
114. Olson R.F., Atoeffler R.C. Analitical method for predicting power jet reattachment laracteristics in wall-attachment-type fluidic devices // Advances in fluidics, 1967. pp. 177-186.
115. Newman B.G. The deflection of jets by adjacent boundaries - Coanda effect // Boundary Layer and FlowControl. Oxford. 1961. Vol. 1. pp. 232-264.

116. Bourque C., Newman B.G. Reattachment of a two-dimensional incompressible jet to the Adjacent flat plate // *Aeronautical Quarterly*, No. 11, 1960.
117. Carpenter P.W., Green P.N. The Aeroacoustics and Aerodynamics of High-Speed Coanda Devices, Part 1: Conventional Arrangement of Exit Nozzle and Surface // *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 208, No. 5, 1997. pp. 777-801.
118. Bradshaw P. Effects of Streamline Curvature on Turbulent Flow, AGARDograph, AGARDograph AG-169, 1990.
119. Patankar U.M., Sridhar K. Three-Dimensional Curved Wall Jets // *Journal of Basic Engineering* (changed to *Journal of Engineering Materials and Technology*; and the *Journal of Fluids Engineering*), Vol. 94, No. 2, 1972. pp. 339-344.
120. Rask R.B. An Experimental Study of Two-Dimensional and Three-Dimensional Curved Wall Jets, University of Minnesota, Ph.D. Thesis 1973.
121. Gregory-Smith D.G., Senior P. The Effects of Base Steps and Axisymmetry on Supersonic Jets over Coanda Surfaces // *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 15, No. 4, 1994. pp. 291-298.
122. Cornelius K.C., Lucius G.A. Physics of Coanda Detachment at High-Pressure Ratio // *Journal of Aircraft*, Vol. 31, No. 3. pp. 591-596.
123. Fekete G.I. Coanda Flow of a Two-Dimensional Wall Jet on the Outside of a Circular Cylinder, Mechanical Engineering Research Laboratories, McGill University, Tech. Rept. 63-11, 1963.
124. Giles A., Hays A.P., Sawyer R.A. Turbulent Wall Jets on Logarithmic Spiral Surfaces // *The Aeronautical Quarterly*. pp. 201-215.
125. Guitton D.E., Newman G. Self-Preserving Turbulent Wall Jets over Convex Surfaces // *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 81, No. 1, 1977. pp. 155-185.
126. Newman B.G. The Prediction of Turbulent Jets and Wall Jets // *Canadian Aeronautics and Space Journal*, Vol. 15, 1969. pp. 287-305.
127. Neuendorf R., Wygnanski I. On a Turbulent Wall Jet Flowing over a Circular Cylinder // *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 381, 1999. pp. 1-25.
128. Bevilaqua M., Lee D. Design of Supersonic Coanda Jet Nozzles // *Proceedings of the Circulation-Control*, Vol. Workshop 1996, 1996.

129. Gregory-Smith G., Gilchrist R. The Compressible Coanda Wall Jet - an Experimental Study of Jet Structure and Breakaway // International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 8, No. 2, 1987. pp. 156-164.
130. Gilchrist R., Gregory-Smith G. Compressible Coanda Wall Jet - Predictions of Jet Structure and Comparison with Experiment // International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 9, No. 3, 1988. pp. 286-295.
131. Carpenter P.W., Green P.N. The Aeroacoustics and Aerodynamics of High-Speed Coanda Devices, Part 1: Conventional Arrangement of Exit Nozzle and Surface // Journal of Sound and Vibration, Vol. 208, No. 5, 1997. pp. 777-801.
132. Juvet J.D. Control of High Reynolds Number Round Jets, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Ph.D. Thesis 1993.
133. Гиневский А.С., Колесников А.В., Подольный И.Н. Метод расчета пристенных турбулентных струй при наличии продольного градиента давления // Ученые записки ЦАГИ, Т. 1, № 4, 1970. С. 34-45.
134. Гиневский А.С., Солодкин Е.Е. Влияние поперечной кривизны поверхности на характеристики осесимметричного турбулентного слоя // ПММ, Т. 22, № 6, 1958.
135. Гиневский А.С., Колесников А.В., Почкина К.А. Экспериментальное исследование осесимметричного пограничного слоя на продольно обтекаемом цилиндре // Ученые записки ЦАГИ, Т. 11, № 4, 1971. С. 52-61.
136. Сыч В.М. Расчет искривленной пристеночной турбулентной струи // Ученые записки ЦАГИ, Vol. 16, No. 3, 1985. pp. 58-68.
137. Сычев В.В. Об отсосе пограничного слоя, предотвращающем его отрыв // Ученые записки ЦАГИ, Т. 5, № 4, 1974. С. 86-89.
138. Петров А.В., Шеломовская В.В. Метод расчета коэффициента импульса струи, потребного для ликвидации отрыва потока на профиле крыла // Труды ЦАГИ, № 1977, 1979.
139. Соколова И.Н. Экспериментальное исследование пределов реализации течения Коанда // Ученые записки ЦАГИ, Т. 14, № 4, 1983. С. 124-126.
140. Соколова И.Н. Использование эффекта Коанда для уменьшения

воздействия струи на преграду // Ученые записки ЦАГИ, Т. 16, № 3, 1985. С. 118-121.

141. Соколова И.Н. Исследование сверхзвукового течения Коанда // Ученые записки ЦАГИ, Т. 16, № 2, 1985. С. 108-111.

142. Соколова И.Н. Горячие струи Коанда // Ученые записки ЦАГИ, Т. 21, № 4, 1990. С. 100-103.

143. Ганич Г.А., Гущина Н.И., Жулев Ю.Г. Эффект Коанда при выдуве струй из прямоугольных сопел под углом к плоской поверхности // Ученые записки ЦАГИ, Т. 25, № 3-4, 1994. С. 121-125.

144. Жулев Ю.Г., Макаров В.А., Наливайко А.Г. Интенсификация эффекта Коанда с помощью создаваемых в струе продольных вихрей // Ученые записки ЦАГИ, Т. 28, № 1, 1997. С. 139-143.

145. Жулев Ю.Г., Макаров В.А., Наливайко А.Г. Способ отклонения осесимметричной струи, распространяющейся вдоль верхней поверхности крыла с закрылком // Ученые записки ЦАГИ, Т. 23, № 1, 1992.

146. Жулев Ю.Г., Макаров В.А., Наливайко А.Г. Интенсификация эффекта Коанда с помощью вводимых в струю продольных вихрей // Ученые записки ЦАГИ, Т. 27, № 1-2, 1996. С. 100-104.

147. Акатнов Н.И. Распространение плоской ламинарной струи истекаемой жидкости вдоль твердой стенки // Труды ЛПИ, техническая гидромеханика, № 5, 1953.

148. Акатнов Н.И., Сюй Мян-Фын. Плоская полуограниченная струя по криволинейной поверхности // ПМТФ, № 6, 1962.

149. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Москва: Издательство "Наука", 1969.

150. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. Москва: Издательство "Энергия", 1968.

151. Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости. Москва: Издательство "Наука", 1965.

152. Идельчик И.Е. Аэродинамика промышленных аппаратов. Москва:

Машиностроение, 1983. 520 с.

153. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва: Наука, 1973. 848 с.

154. Batchelor G. Homogeneous Turbulence. Cambridge. 1955.

155. Wallis G. One-dimensional two-phase flow. New York: McGraw-Hill, 1969.

156. Yan F., Wang Z.Q., Bai C.H., Zhang Q.M. Numerical research on vortex and wave interaction of modulation jet stream // Beijing Ligong Daxue Xuebao, Vol. 1, No. 29, 2009. pp. 90-93.

157. Кельмансон И.А. Исследование турбулентной структуры в свободных турбулентных струях, Алма-Ата, 1968. 17 с.

158. Вулис Л.А., Кельмансон И.А., Палатник И.Б. Исследование структуры течения в плоской турбулентной струе // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, № 4, 1970. С. 176-179.

159. Оспанов М., Балабеков С., Горбунов А., Голубев Г., Добина М., Бакбергенов А. Центробежный пылеуловитель, а.с. SU 1526764 А, Dec 7, 1989.

160. Квашнин И.М., Юнкеров Ю.И. Струйно-инерционный пылеуловитель, патент RU 2102115, Jan 20, 1998.

161. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. Москва: Экопресс, 1998. 505 с.

162. Барский, М. Д. Фракционирование порошков / М. Д. Барский. - М. : Недра, 1980.

163. Ефремов, Г. И. Пылеочистка / Г. И. Ефремов. - М. : Химия, 1990.

164. Квашнин, И. М. Очистка воздуха от пыли: учеб. пособие / И. М. Квашнин, Ю. И. Юнкеров; ПГАСА. - Пенза, 1995.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Список основных условных обозначений

t - время;

m - масса частицы;

$d_{\text{э}}$ - эквивалентный диаметр частицы;

$\rho_{\text{ч}}$ - плотность частицы;

ρ - плотность воздуха;

\vec{P} - сила тяжести определяется вектором;

\vec{g} - вектор ускорения силы тяжести, в расчетах принято $g = 9.81 \text{ м}^2/\text{с}$;

\vec{A} - аэродинамическая сила;

$F_{\text{м}}$ - площадь миделева сечения частицы;

ψ_0 - коэффициент лобового сопротивления в области автомодельности;

Re - число Рейнольдса;

μ - коэффициент динамической вязкости воздуха ($\text{Па} \cdot \text{с}$);

x, y, φ - цилиндрические оси координат;

\vec{u} - вектор скорости несущей среды (воздуха);

u_y, u_{φ} и u_x - соответствующие проекции вектора скорости воздуха;

\vec{v} - вектор скорости частиц;

\vec{v}_0 - вектор скорости частицы в начальный момент времени;

v_x - проекции вектора скорости частицы, соответственно и на вертикальную ось Ox (скорость вертикального перемещения частицы);

v_y - проекции вектора скорости частицы, соответственно на ось Oy (радиальная составляющая скорости);

v_{φ} - проекции вектора скорости частицы, соответственно на перпендикуляр к оси

Oy (окружная скорость);

ω_{φ} - угловая составляющая скорости частицы;

l_∞ – характерная длина;

u_∞ – скорость;

τ_∞ – время;

$x_1; x_2; x_3; x_4; x_5; x_6; \tau$ – безразмерные величины;

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

Fr – число Фруда, учитывающее действие сил тяжести;

St – число Стокса, учитывающее действие аэродинамических сил;

$\frac{u_x}{u_\infty}, \frac{u_y}{u_\infty}, \frac{u_\varphi}{u_\infty}$ – безразмерные составляющие струйного течения, которые должны

быть заданы функциями безразмерных координат x_1, x_2, x_3 ;

u_0 – средняя по расходу скорость воздуха в выпускном отверстии;

b_0 – высота щели;

d_0 – диаметр круглого патрубка;

D – диаметр бункера;

H – высота бункера;

ν_T – коэффициент турбулентного обмена;

$\eta = Bux^\beta$ – независимая переменная аффинных преобразований;

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

u_{xm} и $u_{\varphi m}$ – продольная и окружная составляющая скорости на оси струи;

P_m – избыточное давление на оси струи, Па;

$\alpha, \beta, \epsilon, \delta, A, B, C, D$ – константы автомодельности;

$\eta_{1/2}$ – некоторое «половинное» значение соответствующее значению $u_x/u_{xm} = 0.5$;

$x_{1/2}; y_{1/2}$ – значение координат точек, в которых $u_x/u_{xm} = 0.5$;

I_x – начальный импульс;

u_{x0} – скорость воздуха на выходе из патрубка;

$\bar{x} = x/d_0; \bar{y} = y/d_0$ – безразмерные координаты;

a – экспериментальный коэффициент «турбулентной структуры» струи;

M_x – поток момента количества движения относительно оси ОХ;

M_y – поток момента количества движения относительно оси ОУ;

Q – расход;

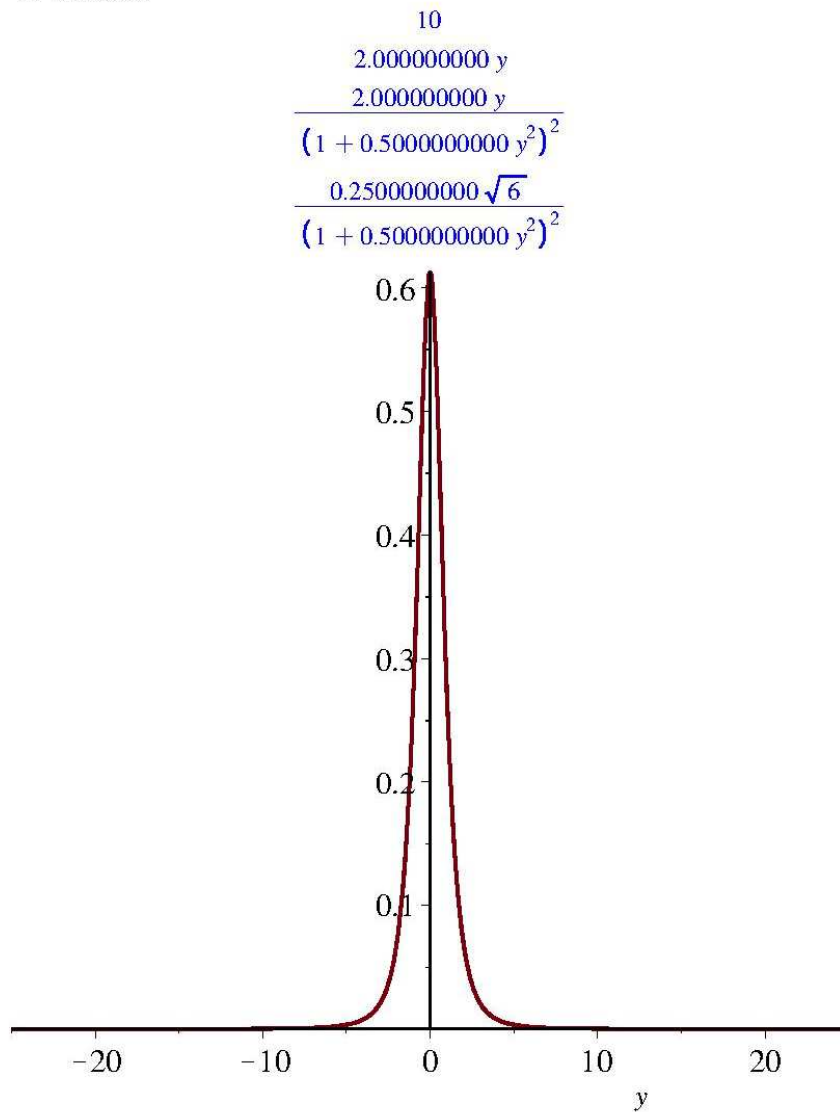
\bar{a} – функция, определяющая изменение безразмерных скоростей.

Приложение Б. Программа расчета проекций скорости осесимметричной струи

```

restart;
a := 0.05 :
Kx :=  $\frac{1}{a} \cdot \sqrt{\frac{3}{32}}$  : Ky :=  $\frac{2 \cdot a}{3} \sqrt{\frac{3}{32}}$  : Kφ :=  $\frac{1}{24 \cdot a^2} \sqrt{\frac{3}{32}}$  ;
for i from 10 by 34 to 350 do x := i; η :=  $\frac{y}{a \cdot x}$  : F2 :=  $\frac{\eta}{(1 + 0.125 \cdot \eta^2)^2}$  : ux :=  $\frac{Kx \cdot F2}{x \cdot \eta}$  : plot(ux,
y = -25 .. 25); od;

```

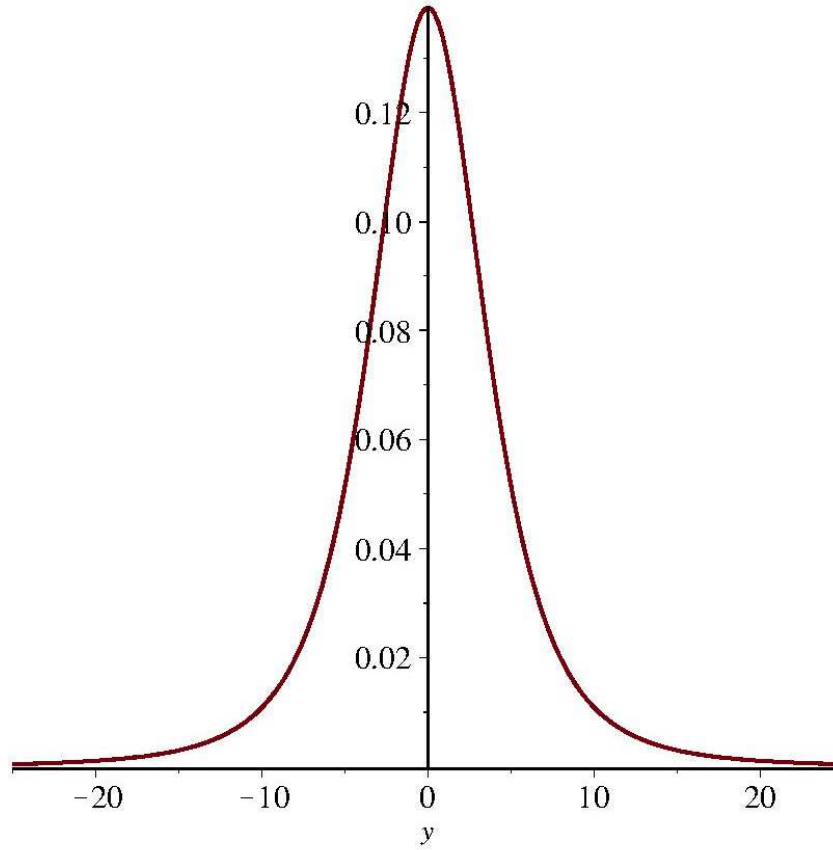


44

0.4545454545 y

$$\frac{0.4545454545 y}{(1 + 0.02582644628 y^2)^2}$$

$$\frac{0.05681818180 \sqrt{6}}{(1 + 0.02582644628 y^2)^2}$$

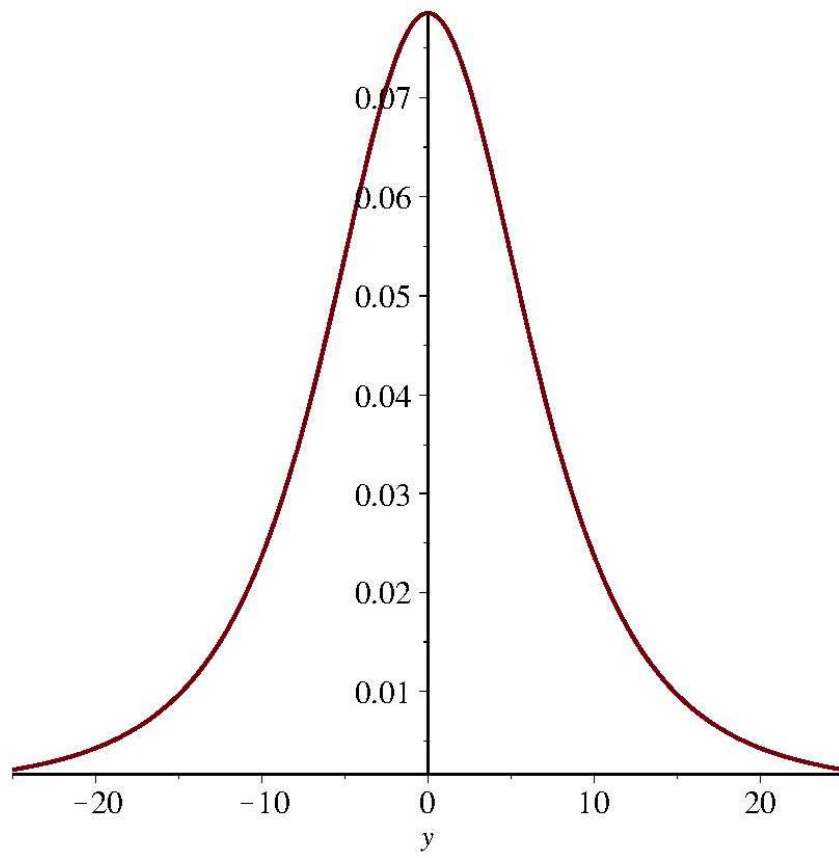


78

$$\frac{0.2564102564 y}{(1 + 0.008218277449 y^2)^2}$$

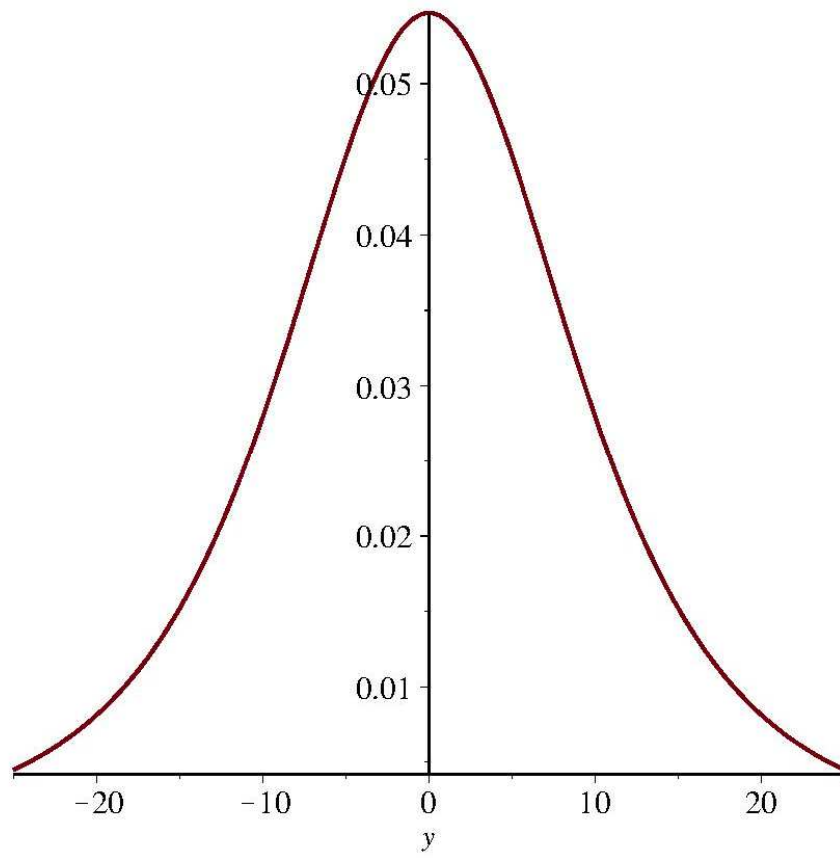
$$\frac{0.2564102564 y}{(1 + 0.008218277449 y^2)^2}$$

$$\frac{0.03205128205 \sqrt{6}}{(1 + 0.008218277449 y^2)^2}$$



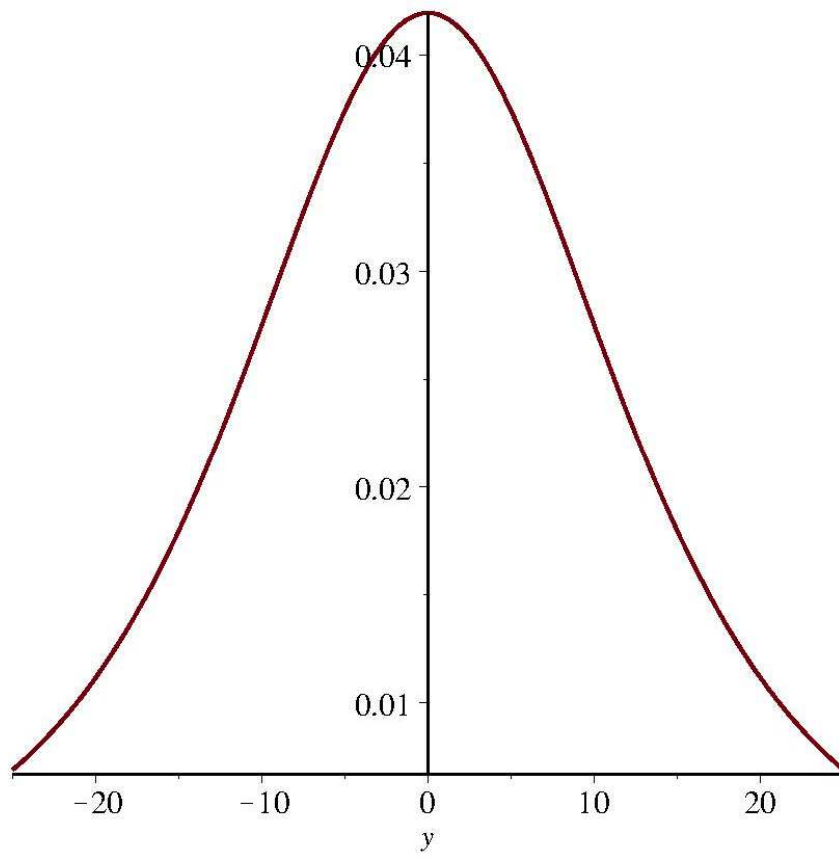
112

$$\frac{0.1785714286 y}{0.1785714286 y} \frac{(1 + 0.003985969389 y^2)^2}{0.02232142857 \sqrt{6}} \frac{(1 + 0.003985969389 y^2)^2}{(1 + 0.003985969389 y^2)^2}$$



146

$$\frac{0.1369863014 y}{0.1369863014 y} \frac{0.01712328767 \sqrt{6}}{(1 + 0.002345655846 y^2)^2}$$

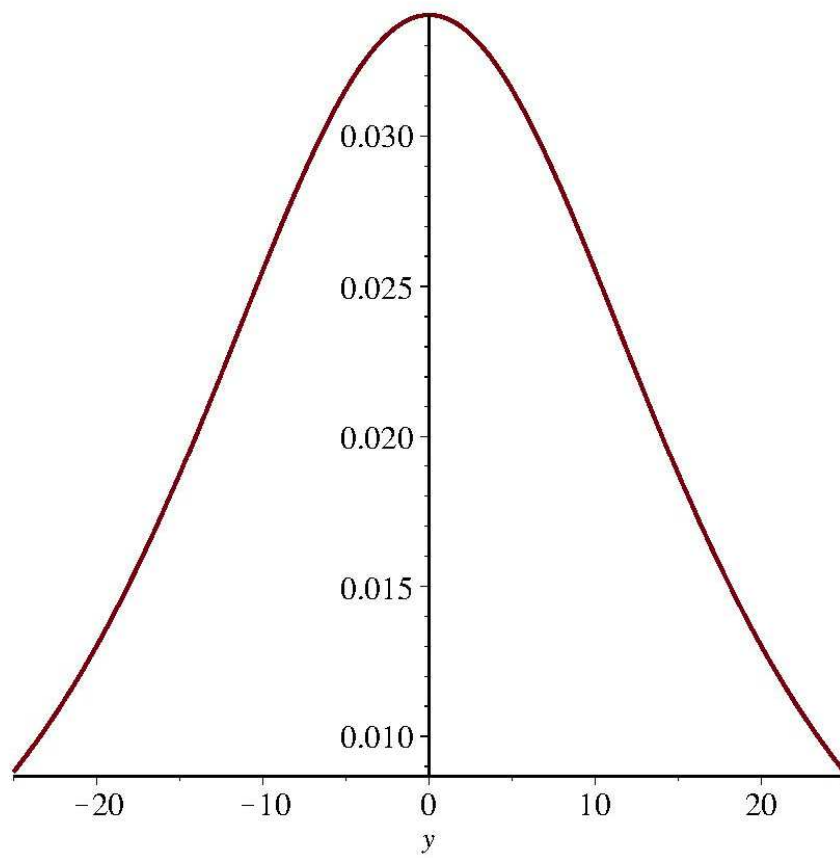


180

$$\frac{0.1111111111 y}{0.1111111111 y}$$

$$\frac{(1 + 0.001543209876 y^2)^2}{0.0138888889 \sqrt{6}}$$

$$\frac{(1 + 0.001543209876 y^2)^2}{(1 + 0.001543209876 y^2)^2}$$



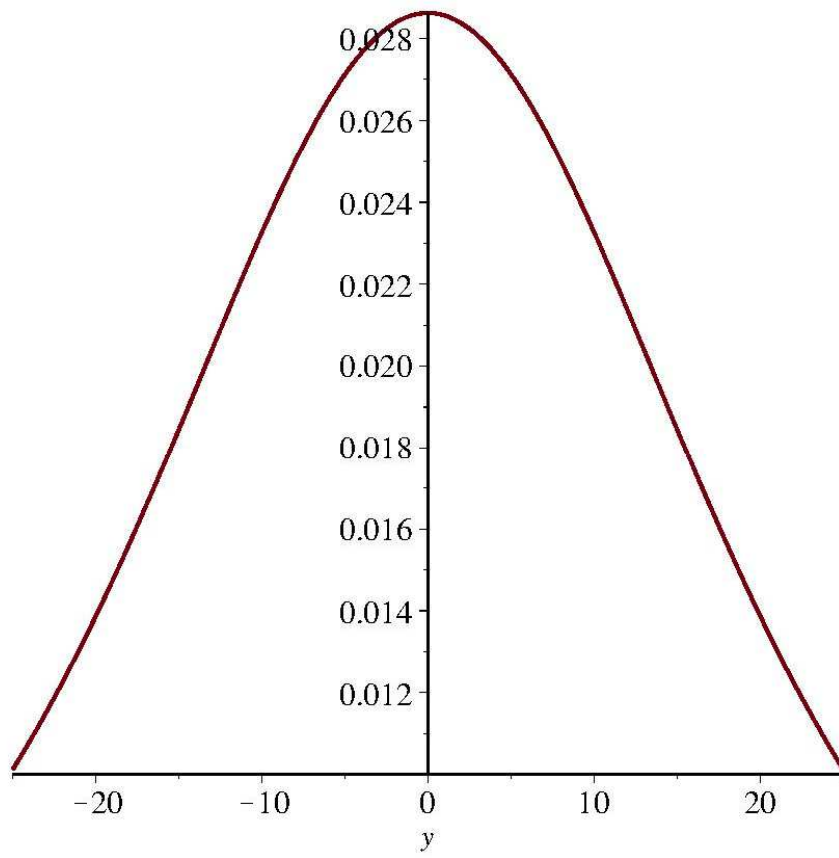
214

$$0.09345794393 y$$

$$\frac{0.09345794393 y}{(1 + 0.001091798410 y^2)^2}$$

$$\frac{0.01168224299 \sqrt{6}}{(1 + 0.001091798410 y^2)^2}$$

$$\frac{0.01168224299 \sqrt{6}}{(1 + 0.001091798410 y^2)^2}$$



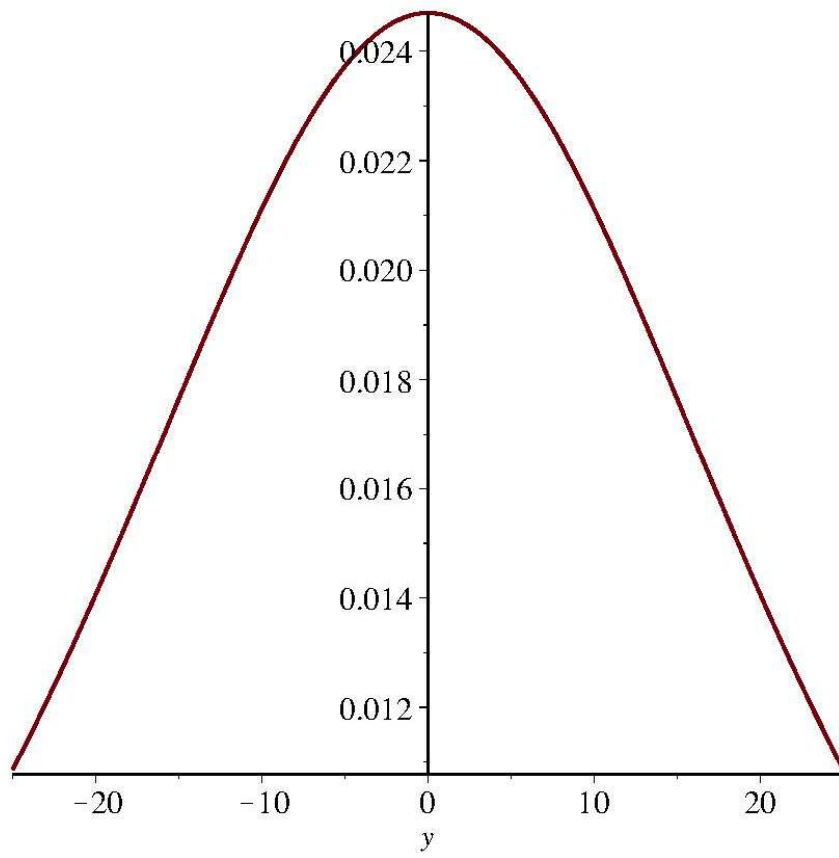
248

$$0.08064516129 y$$

$$\frac{0.08064516129 y}{(1 + 0.0008129552549 y^2)^2}$$

$$\frac{0.01008064516 \sqrt{6}}{(1 + 0.0008129552549 y^2)^2}$$

$$\frac{0.01008064516 \sqrt{6}}{(1 + 0.0008129552549 y^2)^2}$$



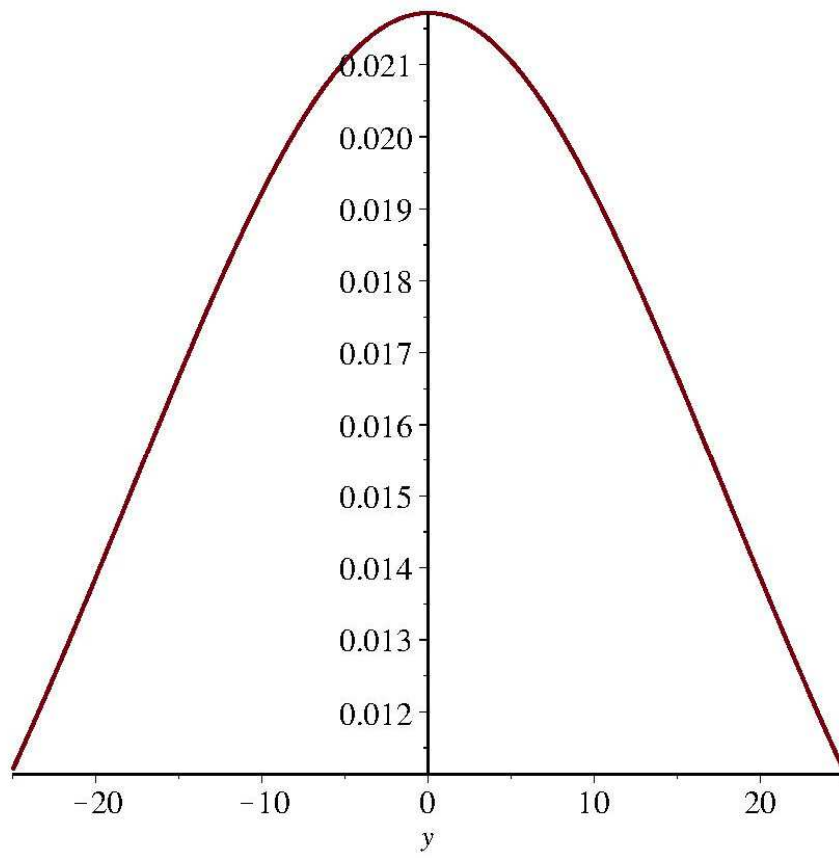
282

$$0.07092198582 y$$

$$\frac{0.07092198582 y}{(1 + 0.0006287410091 y^2)^2}$$

$$\frac{0.008865248229 \sqrt{6}}{(1 + 0.0006287410091 y^2)^2}$$

$$\frac{0.008865248229 \sqrt{6}}{(1 + 0.0006287410091 y^2)^2}$$



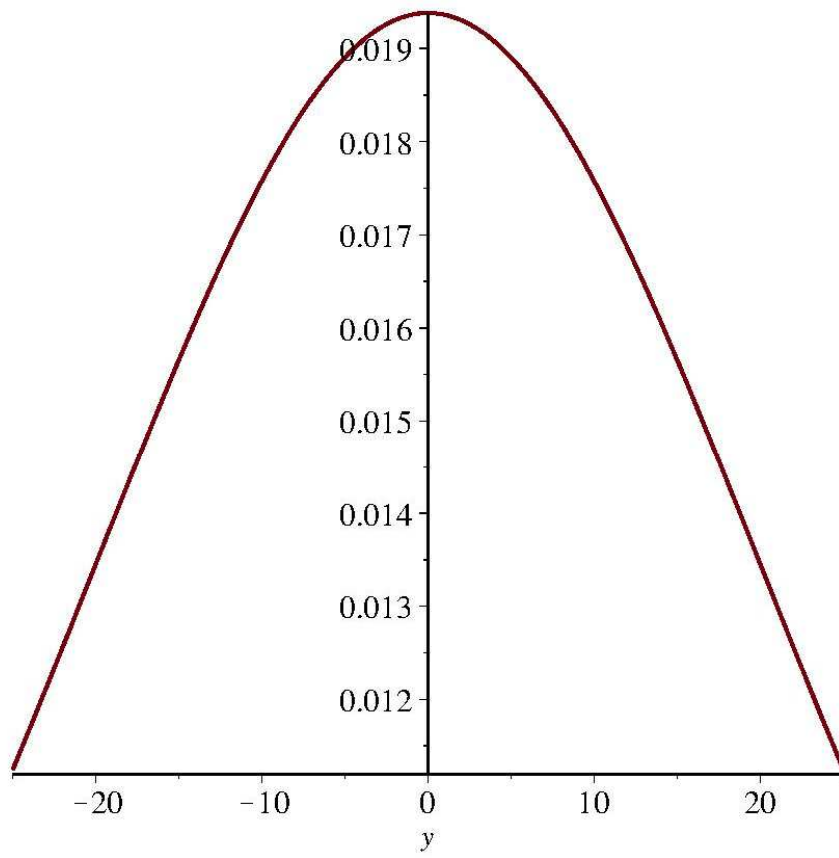
316

$$0.06329113924 y$$

$$\frac{0.06329113924 y}{(1 + 0.0005007210382 y^2)^2}$$

$$\frac{0.007911392405 \sqrt{6}}{(1 + 0.0005007210382 y^2)^2}$$

$$\frac{0.007911392405 \sqrt{6}}{(1 + 0.0005007210382 y^2)^2}$$



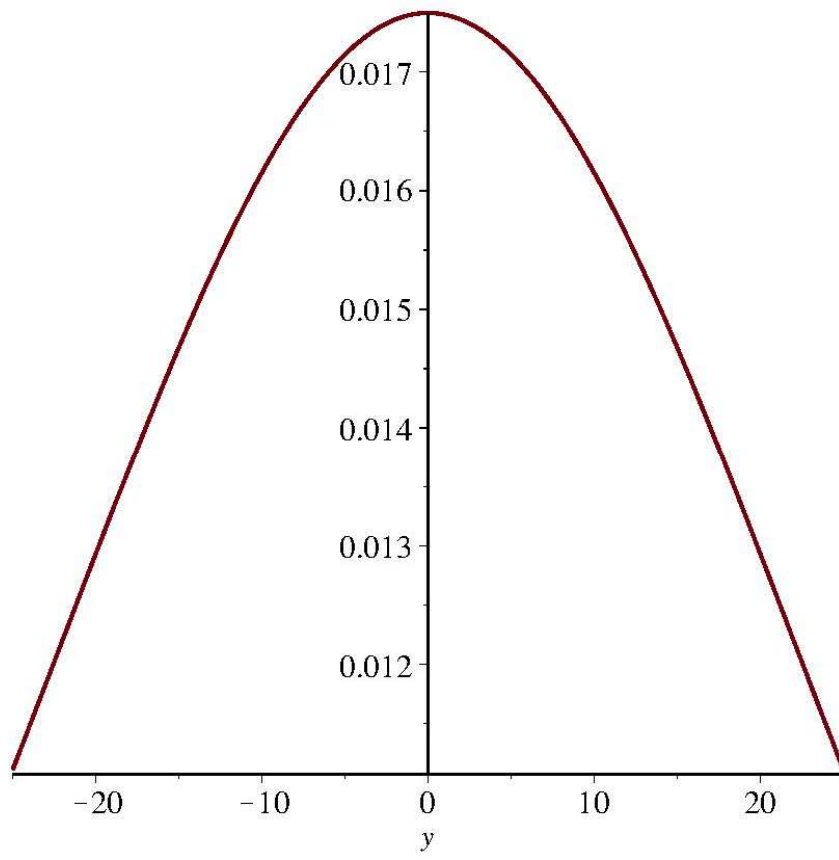
350

$$0.05714285714 y$$

$$\frac{0.05714285714 y}{(1 + 0.0004081632652 y^2)^2}$$

$$\frac{0.007142857140 \sqrt{6}}{(1 + 0.0004081632652 y^2)^2}$$

$$\frac{0.007142857140 \sqrt{6}}{(1 + 0.0004081632652 y^2)^2}$$

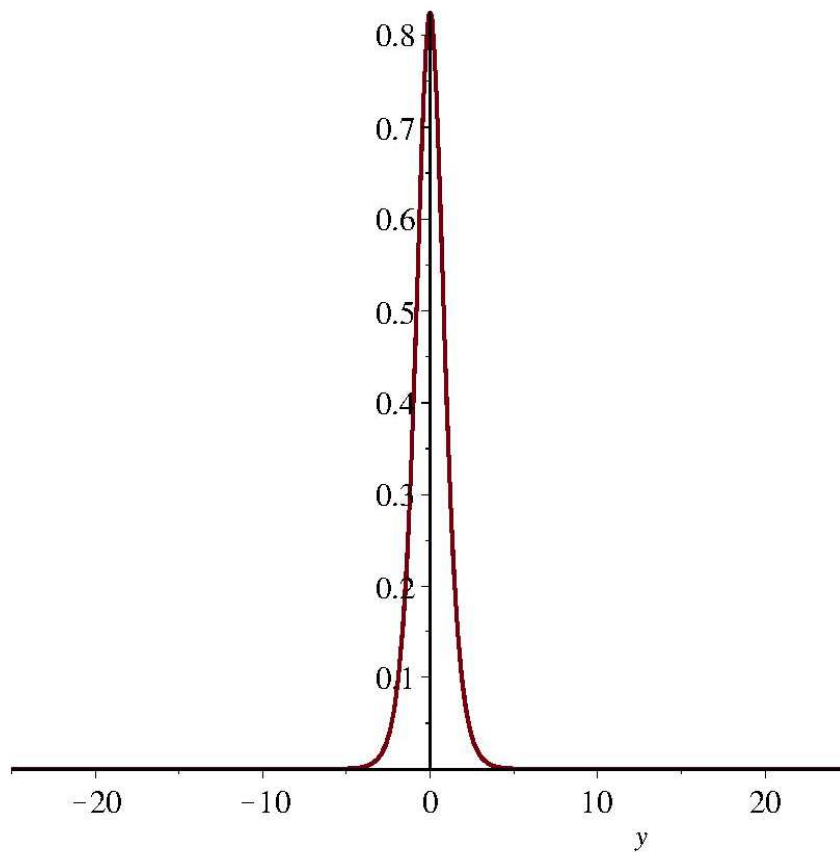


Приложение В. Программа расчета проекций скорости плоской струи

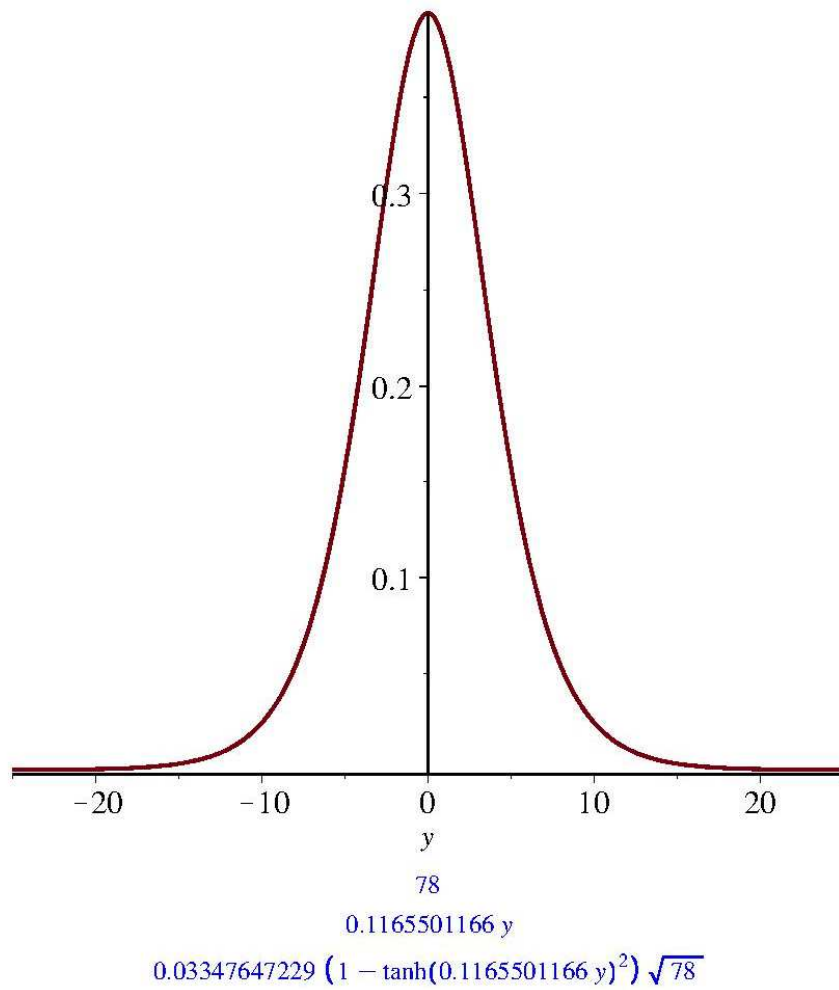
```

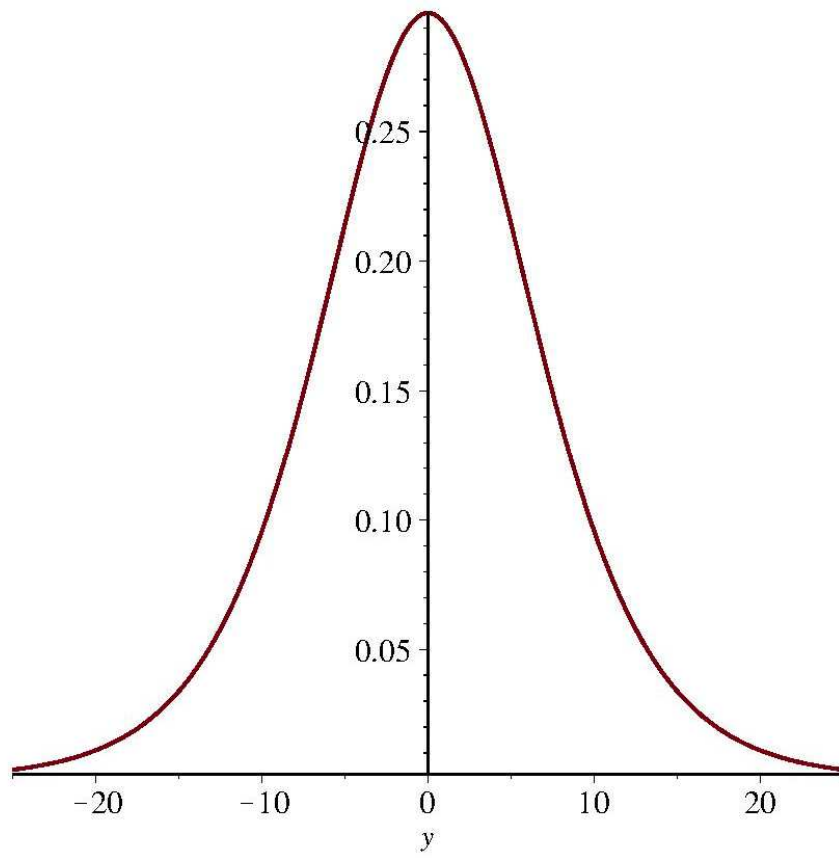
restart;
a := 0.11 :
Kx :=  $\sqrt{\frac{3}{4 \cdot a}}$  : Ky :=  $\sqrt{\frac{3 \cdot a}{4}}$  :
for i from 10 by 34 to 350 do x := i;  $\eta := \frac{y}{a \cdot x}$  :  $ux := Kx \cdot \frac{1 - \tanh^2(\eta)}{\sqrt{x}}$  : plot(ux, y=-25..25); od;

```



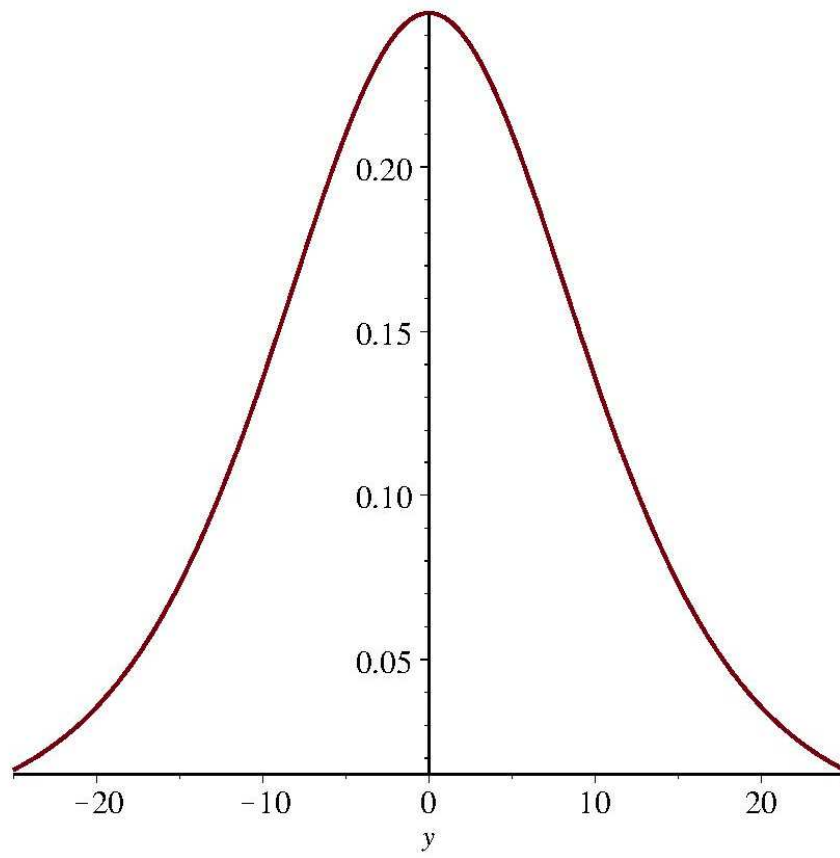
44
0.2066115702 y
0.1186893109 (1 - tanh(0.2066115702 y)²) $\sqrt{11}$





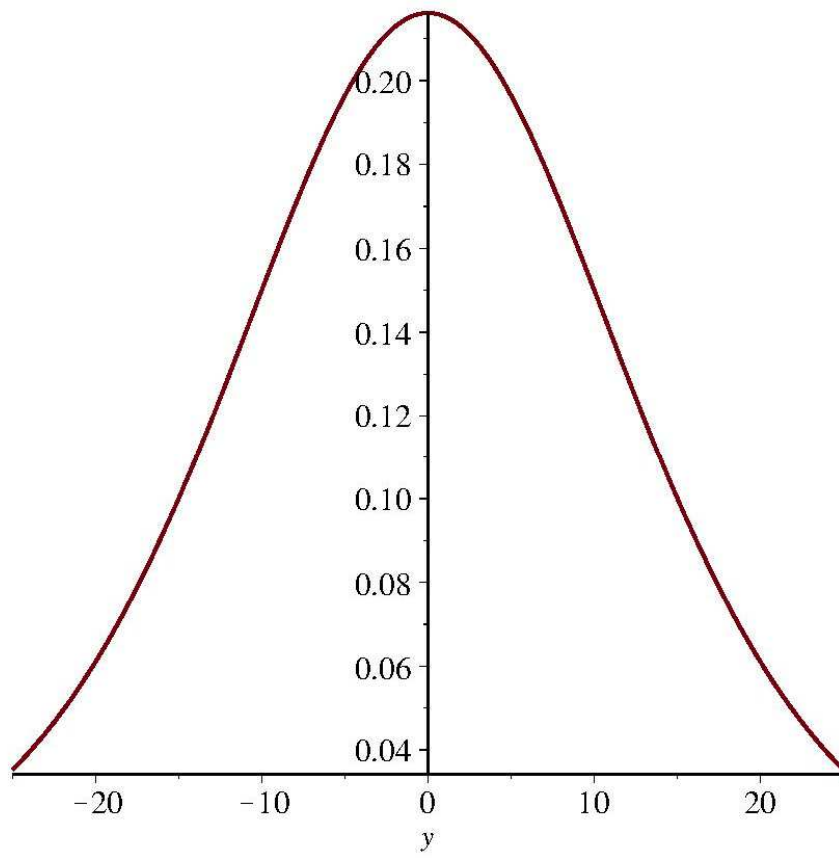
112

 $0.08116883117 y$ $0.09325588711 (1 - \tanh(0.08116883117 y)^2) \sqrt{7}$



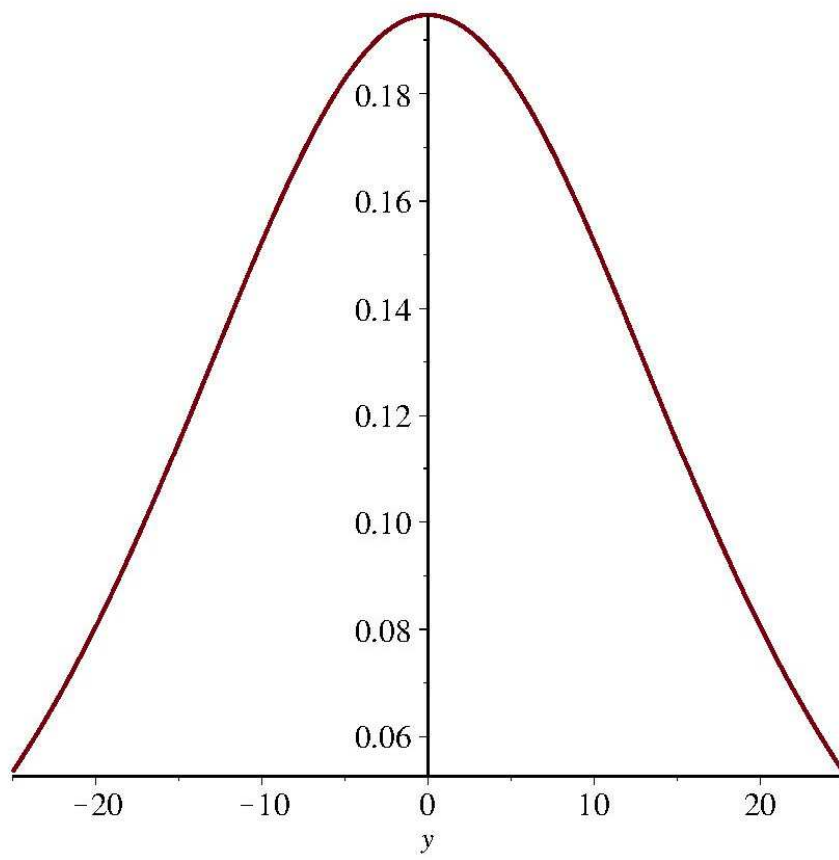
146

 $0.06226650062 y$ $0.01788469068 (1 - \tanh(0.06226650062 y)^2) \sqrt{146}$



180

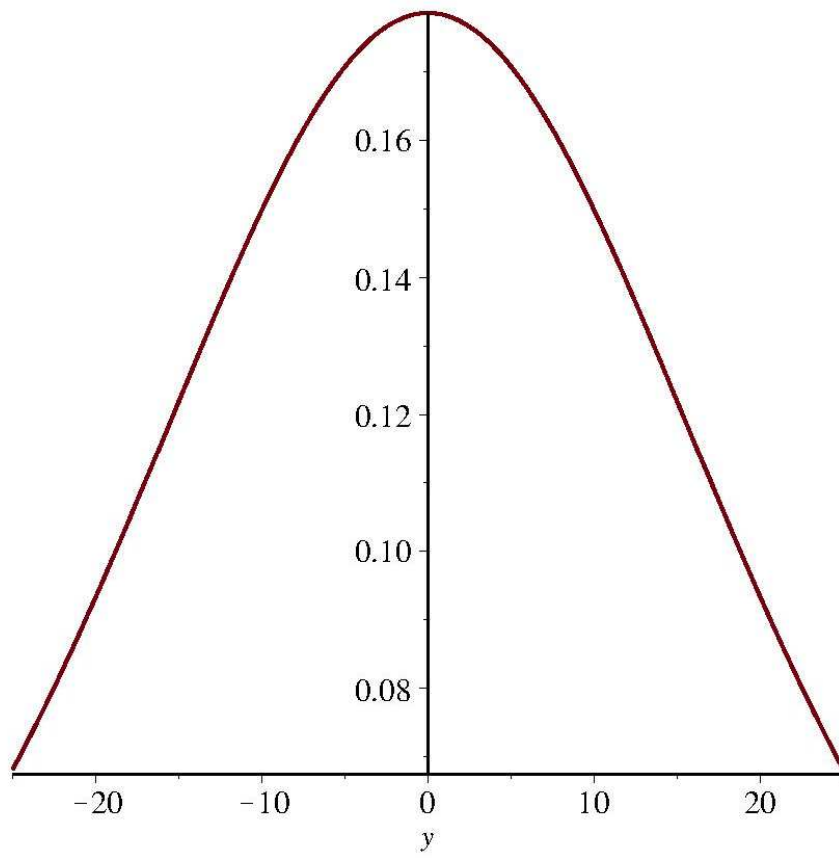
 $0.05050505051 y$ $0.08703882796 (1 - \tanh(0.05050505051 y)^2) \sqrt{5}$



214

0.04248088360 y

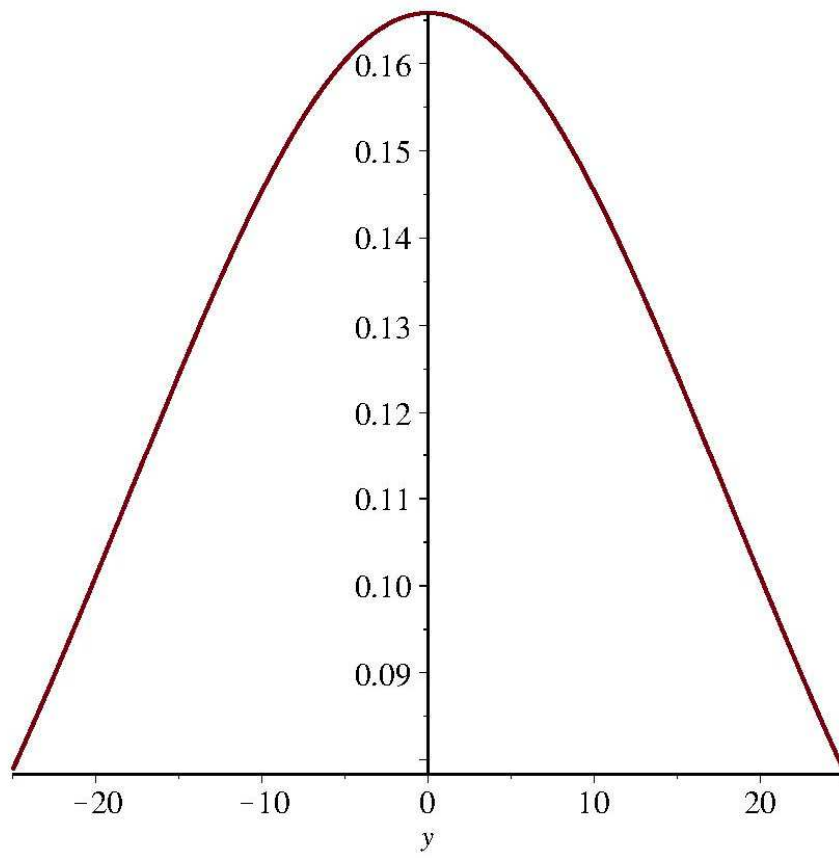
$$0.01220170486 (1 - \tanh(0.04248088360 y)^2) \sqrt{214}$$



248

0.03665689150 y

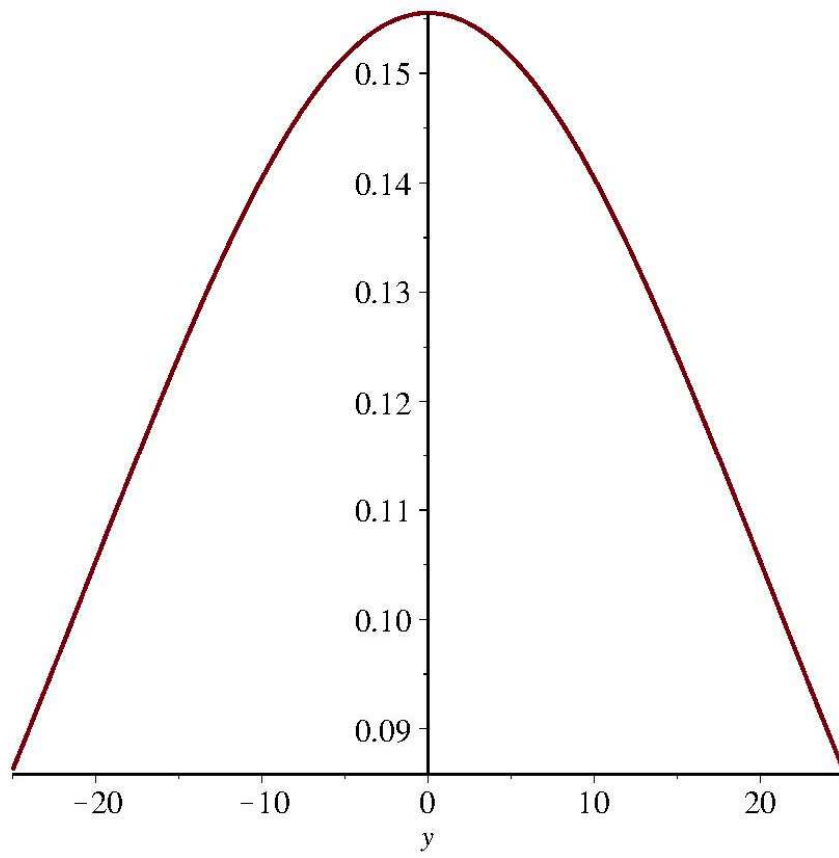
$$0.02105778097 (1 - \tanh(0.03665689150 y)^2) \sqrt{62}$$



282

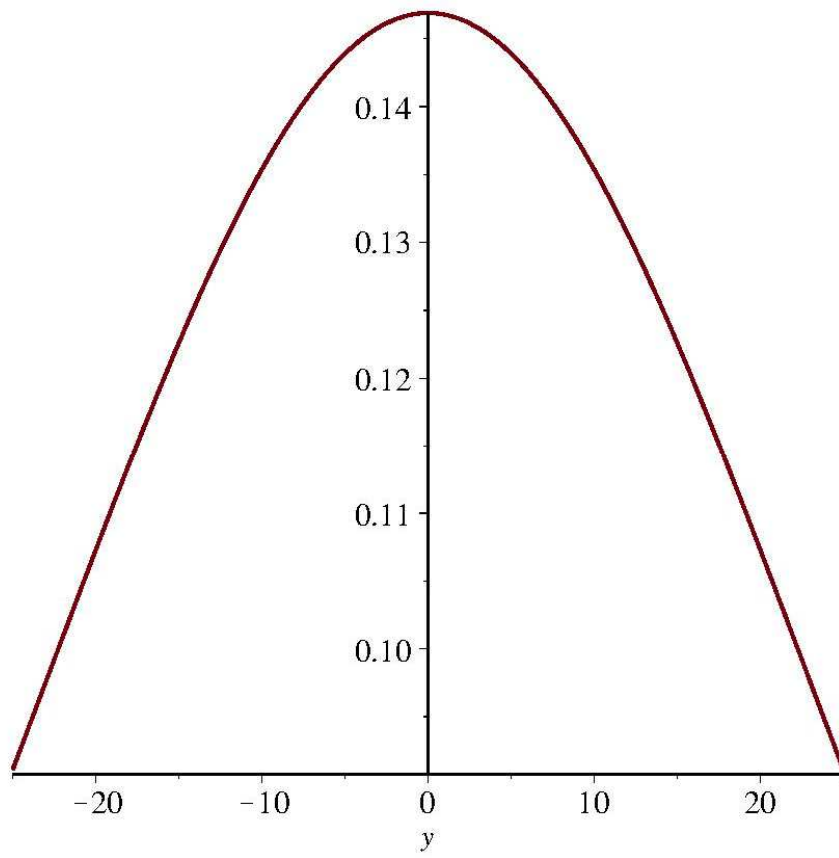
0.03223726628 y

$$0.009259449784 (1 - \tanh(0.03223726628 y)^2) \sqrt{282}$$



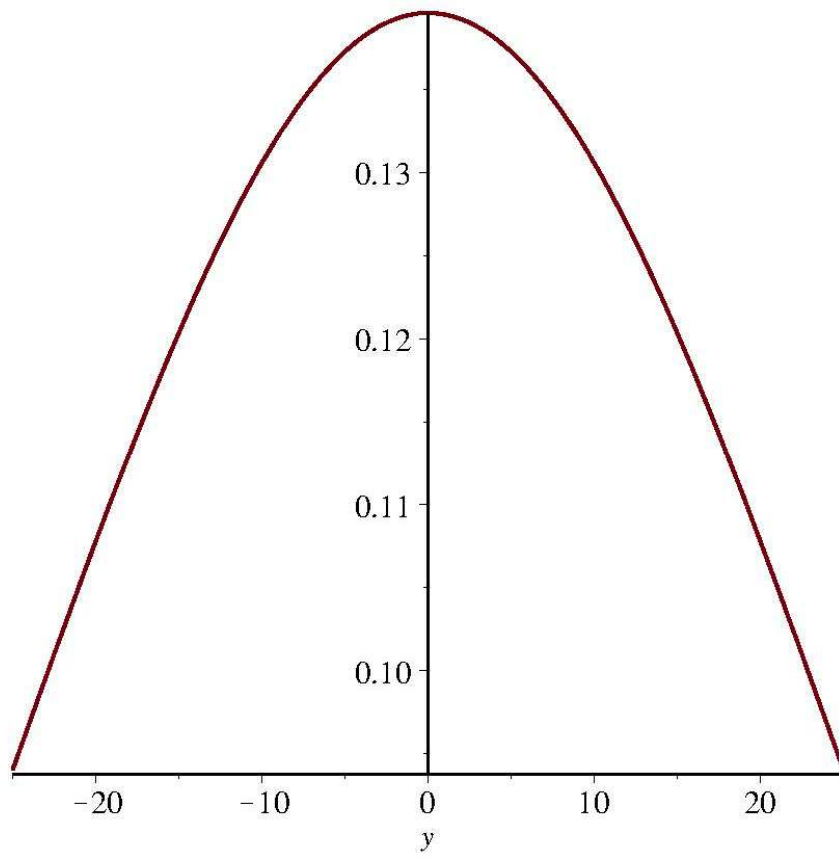
316

 $0.02876869966 y$ $0.01652635975 (1 - \tanh(0.02876869966 y)^2) \sqrt{79}$



350

 $0.02597402597 y$ $0.03730235484 (1 - \tanh(0.02597402597 y)^2) \sqrt{14}$

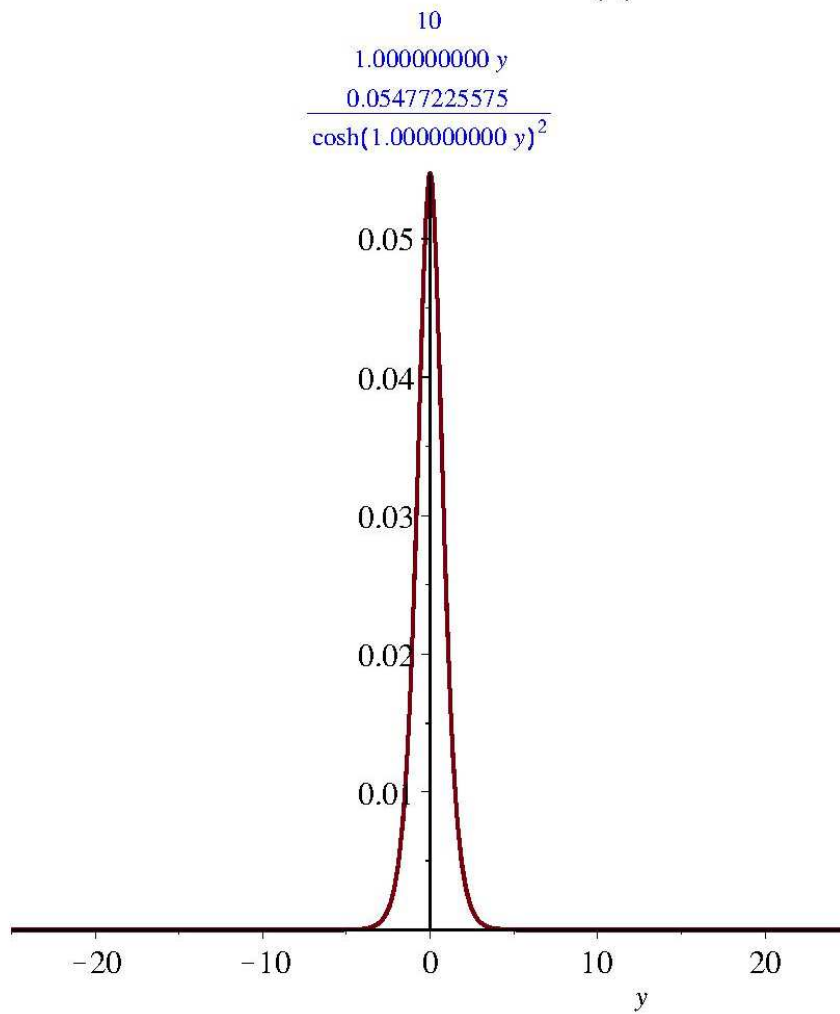


Приложение Г. Программа расчета проекций скорости веерной струи

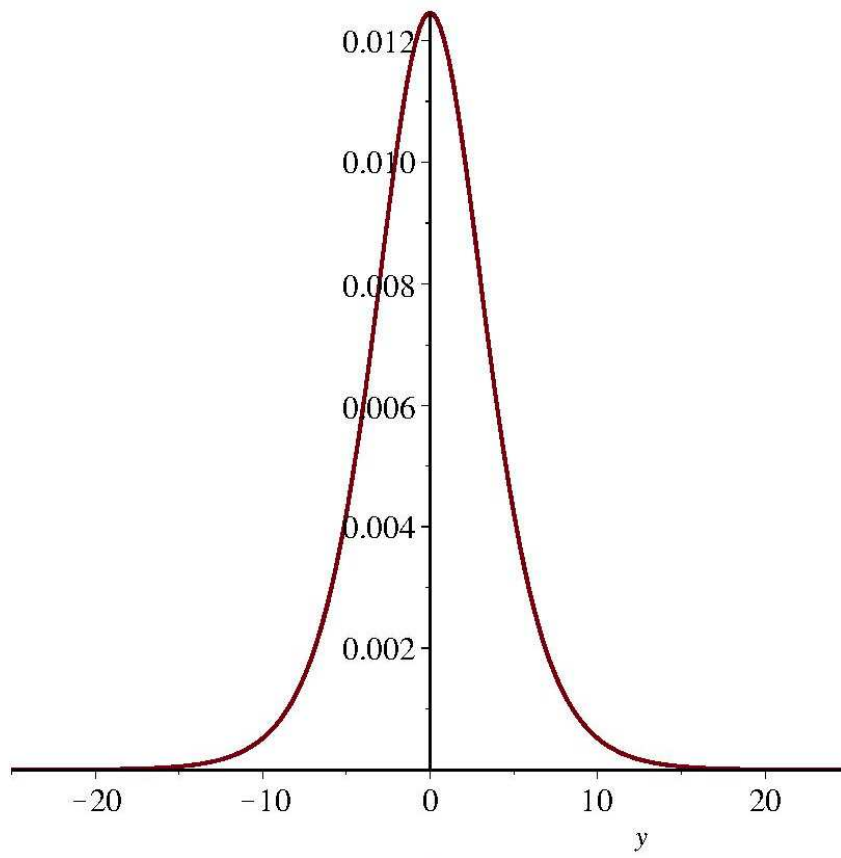
```

restart;
a := 0.1 : r :=  $\frac{0.08}{2}$  :
Kx :=  $\sqrt{\frac{3 \cdot r}{4 \cdot a}}$  : Ky :=  $\sqrt{\frac{3 \cdot a \cdot r}{4}}$  :
for i from 10 by 34 to 350 do x := i;  $\eta := \frac{y}{a \cdot x}$  : ux :=  $\frac{Kx}{x \cdot \cosh^2(\eta)}$  : plot(ux, y = -25 .. 25); od;

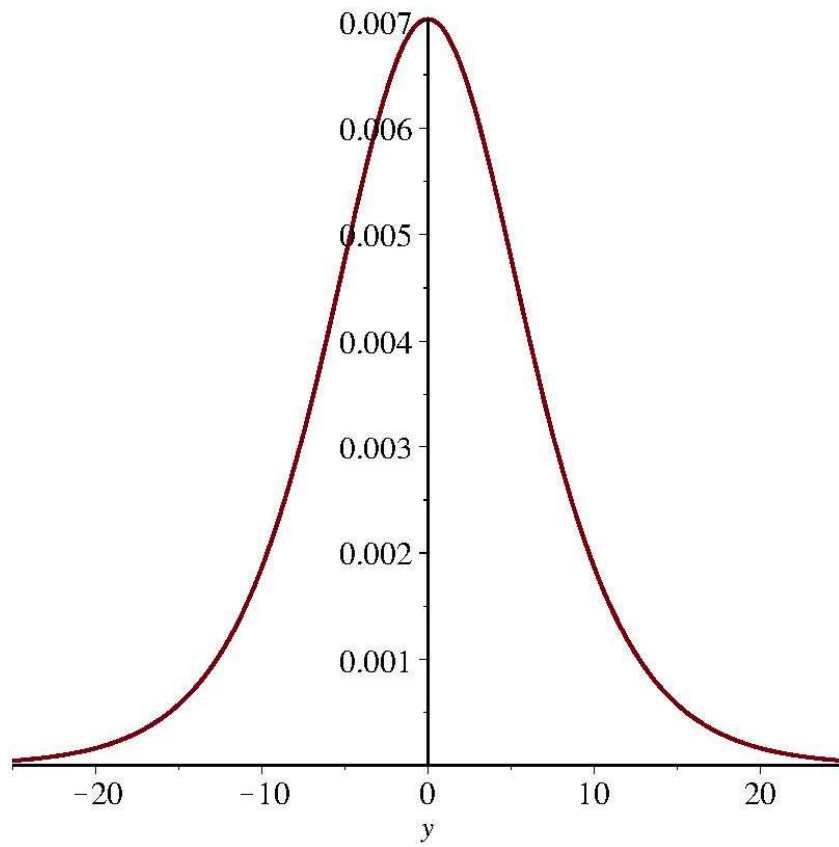
```



$$\frac{0.01244823994}{\cosh(0.2272727273 y)^2}$$

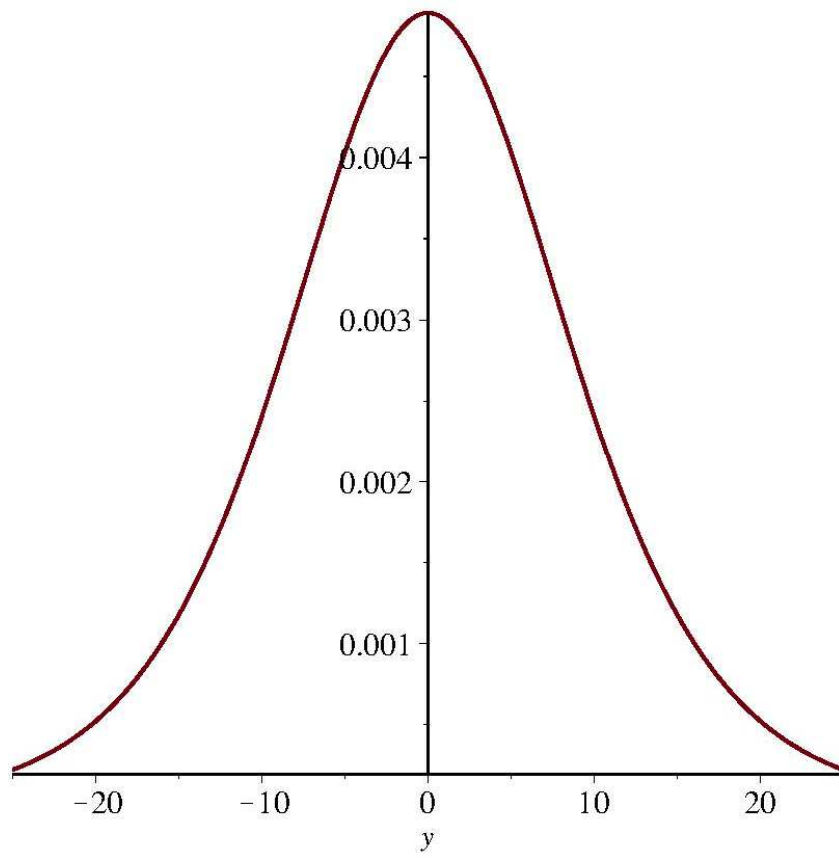


$$\frac{78}{\frac{0.1282051282 y}{0.007022084071} \cosh(0.1282051282 y)^2}$$



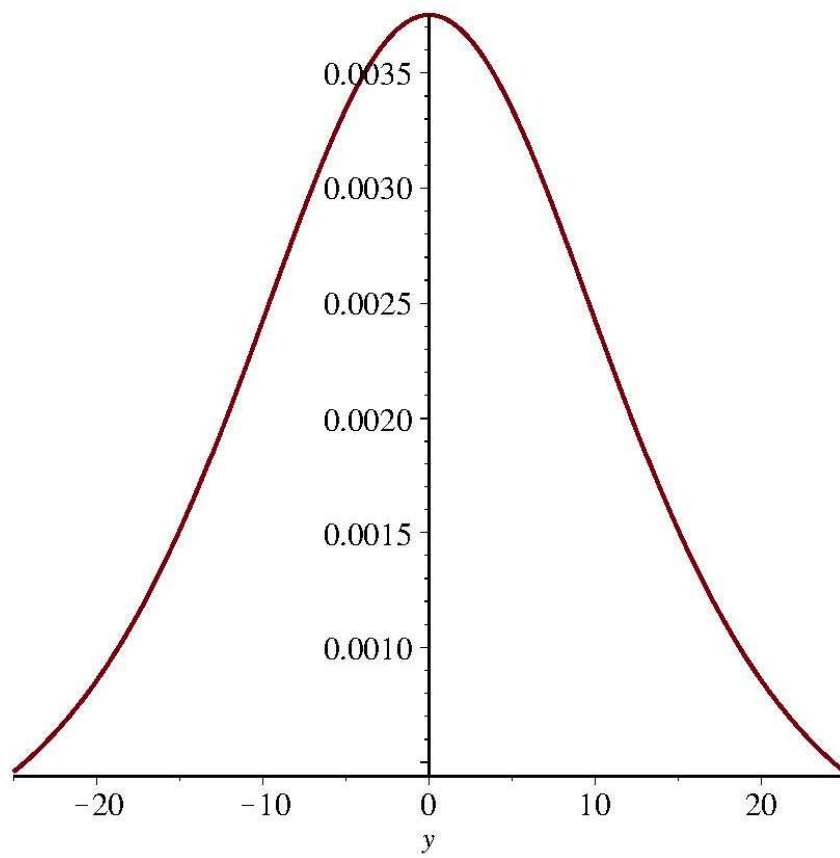
112

 $0.08928571429 y$ 0.004890379978 $\frac{0.004890379978}{\cosh(0.08928571429 y)^2}$



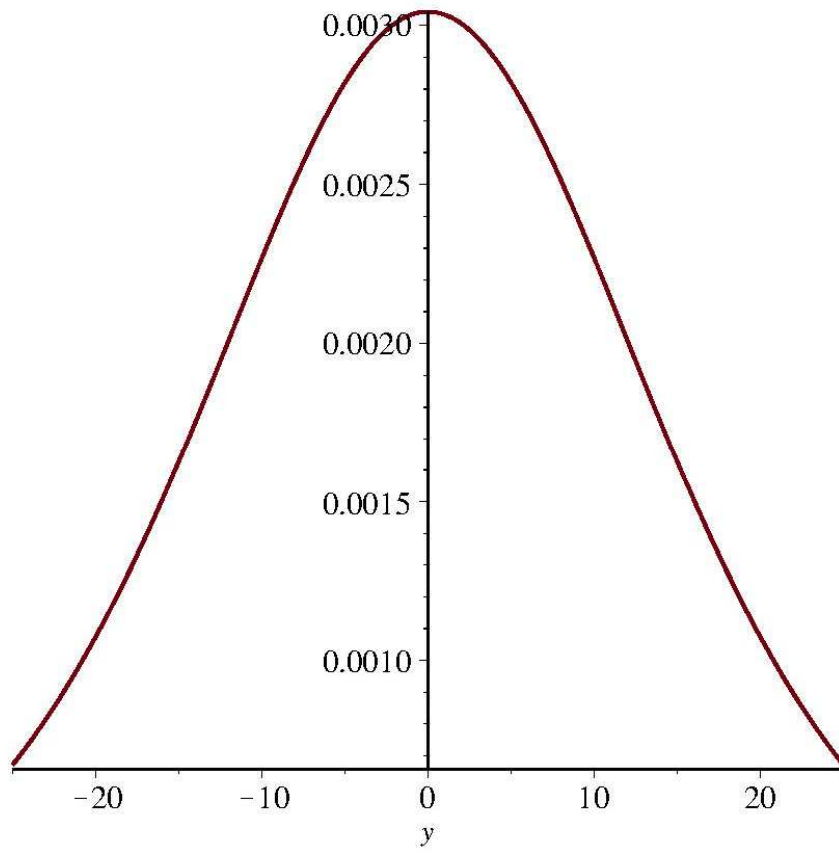
146

 $0.06849315068 y$ 0.003751524366 $\frac{0.003751524366}{\cosh(0.06849315068 y)^2}$



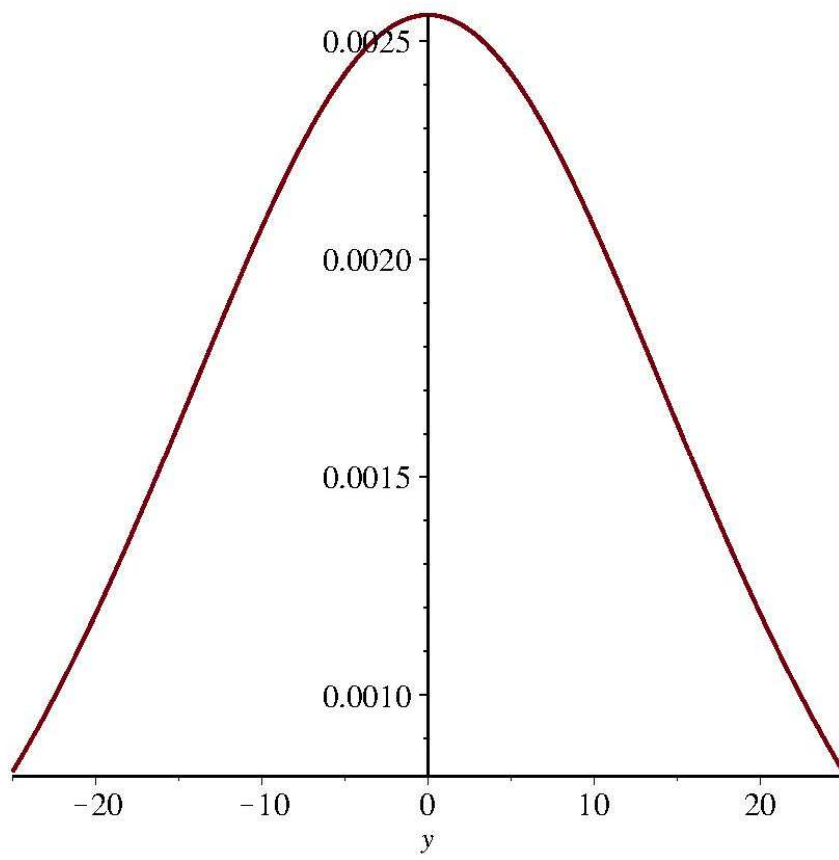
180

 $0.0555555556 y$ 0.003042903097 $\frac{0.003042903097}{\cosh(0.0555555556 y)^2}$

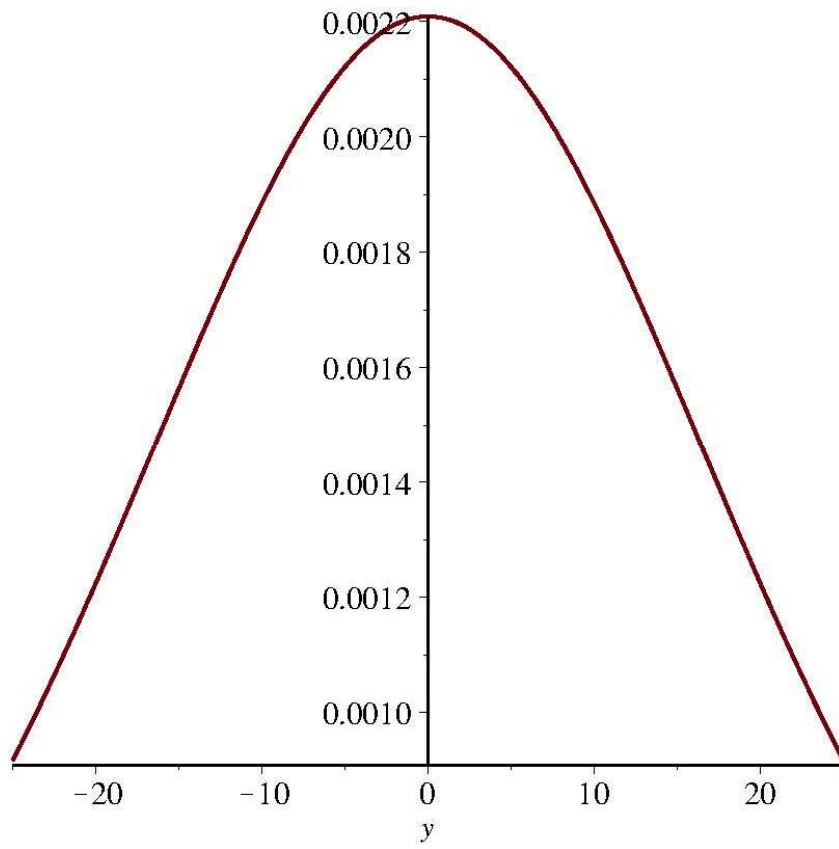


214

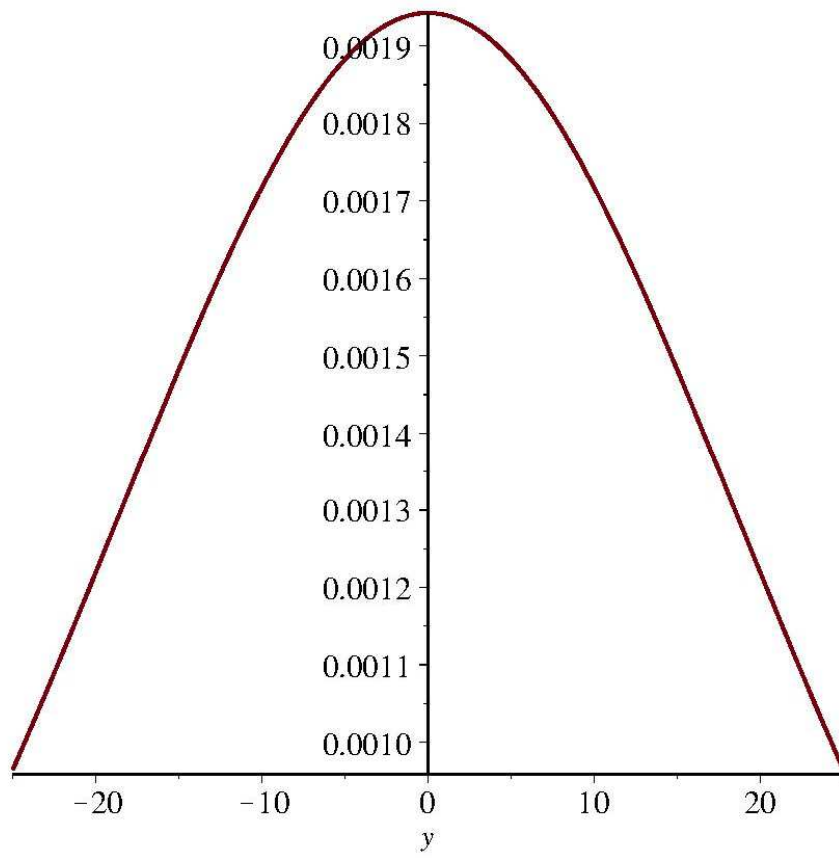
 $0.04672897196 y$ 0.002559451203 $\frac{0.002559451203}{\cosh(0.04672897196 y)^2}$



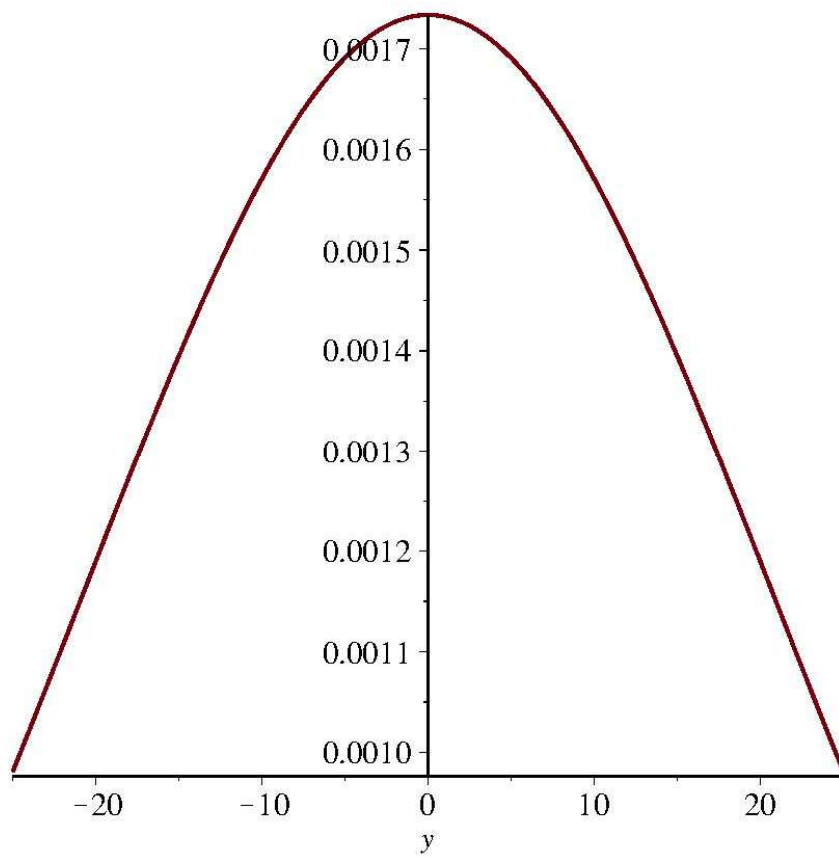
$$\frac{248}{\cosh(0.04032258065 y)^2}$$



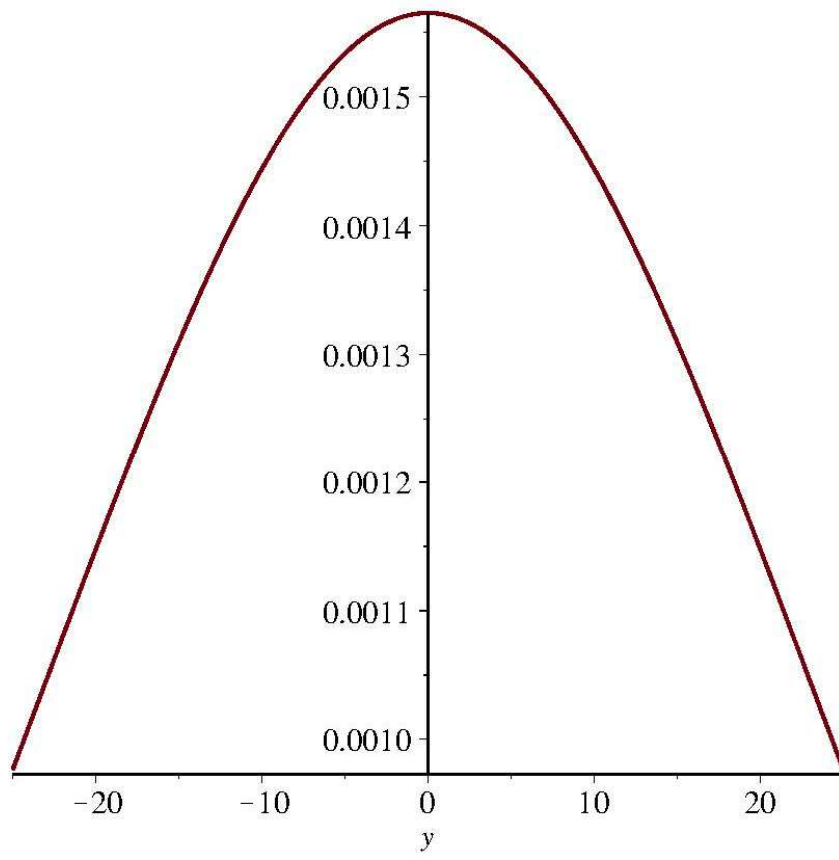
$$\frac{282}{\cosh(0.03546099291 y)^2}$$



$$\frac{316 \cdot 0.03164556962 y}{\cosh(0.03164556962 y)^2} + 0.001733299233$$



$$\frac{350}{\cosh(0.02857142857 y)^2} + \frac{0.001564921593}{\cosh(0.02857142857 y)^2}$$



Приложение Д. Программа расчета траекторий полета пылевой частицы при формировании веерной струи в узле загрузке бункера

restart;
 $a := 0.2 : d4 := 10 \cdot 10^{(-6)} : \rho4 := 2400 : \mu := 19 \cdot 10^{(-6)} : DI := 15 : d0 := 0.08 : u0$
 $:= 15 : \rho := 1.2 : \beta := 45 :$

$$u\varphi0 := \frac{u0}{\tan\left(\text{evalf}\left(\frac{\beta}{180} \cdot \pi\right)\right)} :$$

$$Q := \text{evalf}\left(\frac{\pi \cdot d0^2}{4} \cdot u0\right) :$$

$$Jx := \rho \cdot Q \cdot u0 :$$

$$Mx := Jx \cdot \frac{d0 \cdot u\varphi0}{3 \cdot u0} :$$

$$A := \sqrt{\frac{3 \cdot Jx}{\text{evalf}(8 \cdot \pi \cdot \rho \cdot a^2)}} : B := \frac{1}{a} : C := \frac{3 \cdot Mx}{32 \cdot \rho \cdot a^2} \sqrt{\frac{8 \cdot \rho}{\text{evalf}(3 \cdot \pi \cdot Jx)}} :$$

$$A1 := \frac{A}{DI \cdot u0} : A2 := \frac{a \cdot A}{DI \cdot u0} : A3 := \frac{C}{DI^2 \cdot u0} :$$

$$Fr := \frac{9.81 \cdot DI}{u0^2} : St := \frac{d4^2 \cdot \rho4 \cdot u0}{18 \cdot \mu \cdot DI} :$$

$$z := (t) \rightarrow \frac{x2(t)}{a \cdot x1(t)} ;$$

$$t \rightarrow \frac{x2(t)}{a \cdot x1(t)} \quad (1)$$

$$z1 := (t) \rightarrow 1 + 0.125 \cdot z(t)^2 ;$$

$$t \rightarrow 1 + 0.125 \cdot z(t)^2 \quad (2)$$

$$f1 := (t) \rightarrow \frac{1}{z1(t)^2} ;$$

$$t \rightarrow \frac{1}{z1(t)^2} \quad (3)$$

$$f2 := (t) \rightarrow \frac{z(t)}{z1(t)} \cdot \left(\frac{1}{z1(t)} - 0.5 \right) ;$$

$$t \rightarrow \frac{z(t) \left(\frac{1}{zI(t)} - 0.5 \right)}{zI(t)} \quad (4)$$

$$f3 := (t) \rightarrow zI(t) \cdot fI(t); \quad t \rightarrow zI(t) fI(t) \quad (5)$$

$$f4 := (t) \rightarrow \frac{A1 \cdot fI(t)}{xI(t)}; \quad t \rightarrow \frac{A1 fI(t)}{xI(t)} \quad (6)$$

$$f5 := (t) \rightarrow \frac{A2 \cdot f2(t)}{xI(t)}; \quad t \rightarrow \frac{A2 f2(t)}{xI(t)} \quad (7)$$

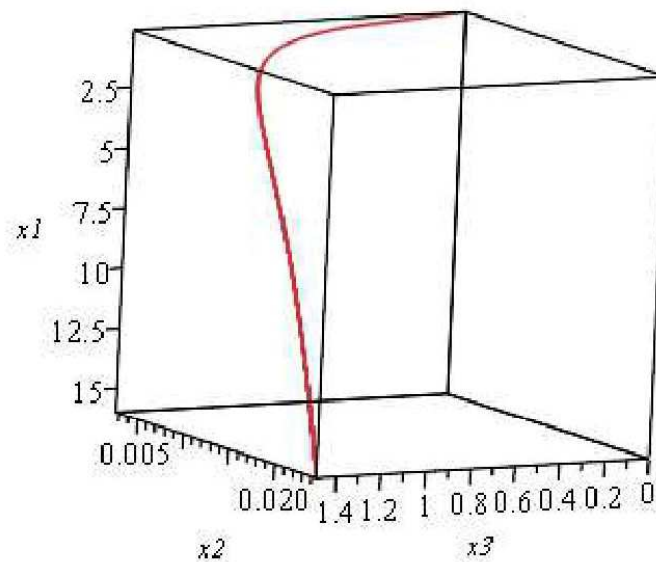
$$f6 := (t) \rightarrow \frac{A3 \cdot f3(t)}{xI(t)^2}; \quad t \rightarrow \frac{A3 f3(t)}{xI(t)^2} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} ODE := & D(x1)(t) = x4(t), D(x2)(t) = x5(t), D(x3)(t) = x6(t), D(x4)(t) = Fr + \frac{1}{St} \\ & \cdot (f4(t) - x4(t)), D(x5)(t) = x2(t) \cdot x6(t)^2 + \frac{1}{St} \cdot (f5(t) - x5(t)), D(x6)(t) = \frac{1}{x2(t)} \\ & \cdot \left(-2 \cdot x5(t) \cdot x6(t) + \frac{1}{St} \cdot (f6(t) - x2(t) \cdot x6(t)) \right); \\ D(x1)(t) = & x4(t), D(x2)(t) = x5(t), D(x3)(t) = x6(t), D(x4)(t) = 0.6540000000 \quad (9) \\ & + \frac{11.63507628}{\left(1 + \frac{3.125000000 x2(t)^2}{xI(t)^2} \right)^2} xI(t) - 1425 x4(t), D(x5)(t) = x2(t) x6(t)^2 \\ & + \frac{11.63507629 x2(t) \left(\frac{1}{1 + \frac{3.125000000 x2(t)^2}{xI(t)^2}} - 0.5 \right)}{xI(t)^2 \left(1 + \frac{3.125000000 x2(t)^2}{xI(t)^2} \right)} - 1425 x5(t), D(x6)(t) \\ & = \frac{-2 x5(t) x6(t) + \frac{0.02585572508}{\left(1 + \frac{3.125000000 x2(t)^2}{xI(t)^2} \right) xI(t)^2} - 1425 x2(t) x6(t)}{x2(t)} \end{aligned}$$

```
ic := x1(0) = 0.1, x2(0) =  $\frac{d0}{2 \cdot D1}$ , x3(0) = 0, x4(0) = 0, x5(0) = 0, x6(0) = 0;
      x1(0) = 0.1, x2(0) = 0.0026666666666666, x3(0) = 0, x4(0) = 0, x5(0) = 0, x6(0) = 0      (10)
```

```
Fs := dsolve({ODE, ic}, {x1(t), x2(t), x3(t), x4(t), x5(t), x6(t)}, numeric, method
  = dverk78, output = listprocedure);
[t = proc(t) ... end proc, x1(t) = proc(t) ... end proc, x2(t) = proc(t) ... end proc, x3(t) =
  proc(t)
  ...
end proc, x4(t) = proc(t) ... end proc, x5(t) = proc(t) ... end proc, x6(t) = proc(t)
  ...
end proc]
```

```
plots[odeplot](Fs, [x1(t), x2(t), x3(t)], 0..10000, numpoints = 3000, color = orange, axes = boxed);
```



Приложение Е. Описание полезной модели к патенту RU 48318

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **48 318** (13) **U1**
 (51) МПК⁷ **B 65 G 69/18**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
 ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ(титульный лист)

(21), (22) Заявка: 2005117396/22, 06.06.2005

(24) Дата начала действия патента: 06.06.2005

(45) Опубликовано: 10.10.2005 Бюл. № 28

Адрес для переписки:

308012, г.Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
 имени В.Г. Шухова, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Логачев И.Н. (RU),
 Овсянников Ю.Г. (RU),
 Семенов А.С. (RU),
 Никитенко Б.Л. (RU)

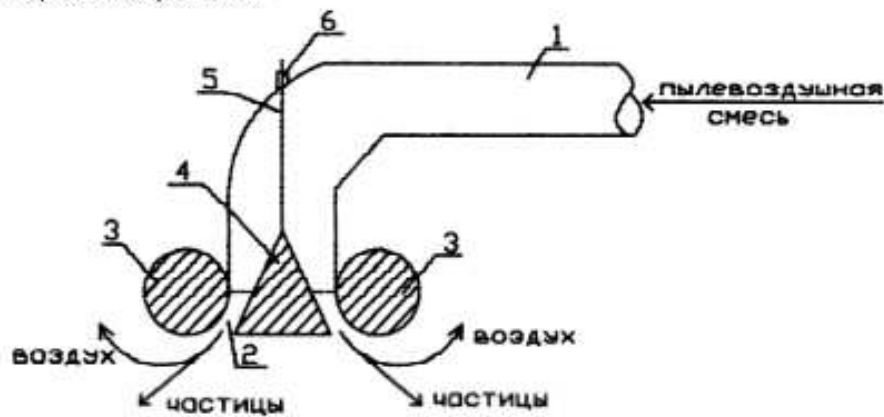
(73) Патентообладатель(ли):

Белгородский государственный
 технологический университет имени В.Г.
 Шухова (БГТУ имени В.Г. Шухова) (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЗАГРУЗКЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Формула полезной модели

Устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов, содержащее сопло и разделитель потока, отличающееся тем, что дополнительно содержит трубопровод пневмотранспорта, а сопло образовано тором и расположенным внутри тора на одной с ним вертикальной оси конусом, обращенным вершиной вверх, при этом тор является вышеуказанным разделителем потока и жестко закреплен на нижней части трубопровода, а вершина конуса связана с трубопроводом с возможностью вертикального перемещения и закрепления.



Приложение Ж. Извещение к патенту на полезную модель RU 48318

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **48 318** ⁽¹³⁾ **U1**
 (51) МПК⁷ **B 65 G 69/18**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
 ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ИЗВЕЩЕНИЯ К ПАТЕНТУ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

(21). (22) Заявка: 2005117396/22, 06.06.2005

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.06.2005

(45) Опубликовано: 10.10.2005

Адрес для переписки:
 308012, г.Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
 имени В.Г. Шухова, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Логачев И.Н. (RU),
 Овсянников Ю.Г. (RU),
 Семенов А.С. (RU),
 Никитанко Б.Л. (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Белгородский государственный технологический
 университет имени В.Г. Шухова (БГТУ имени
 В.Г. Шухова) (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЗАГРУЗКЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

QB1K - Регистрация лицензионного договора на использование полезной модели

(21) Регистрационный номер заявки: 2005117396

Лицензиар(ы): Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
 Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Вид лицензии*: НИЛ

Лицензиат(ы): Некоммерческое партнерство "Межрегиональное объединение ученых и специалистов в
 области строительного материаловедения"

Договор № РД0030949 зарегистрирован 25.12.2007

Извещение опубликовано: 10.02.2008 БИ: 04/2008

* ИЛ - исключительная лицензия НИЛ - неисключительная лицензия

RU 48318 U1

RU 48318 U1

Приложение 3. Описание полезной модели к патенту RU 161397

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **161 397**⁽¹³⁾ **U1**

(51) МПК
E21F 5/20 (2006.01)
B65G 21/08 (2006.01)
B65G 69/18 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015155457/03, 23.12.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.12.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.12.2015

(45) Опубликовано: 20.04.2016 Бюл. № 11

Адрес для переписки:

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
 им. В.Г. Шухова, отдел создания и оценки
 объектов интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Семенов Артем Сергеевич (RU),
 Логачев Иван Николаевич (RU),
 Кондрашева Мария Романовна (RU),
 Алифанова Алла Ивановна (RU)

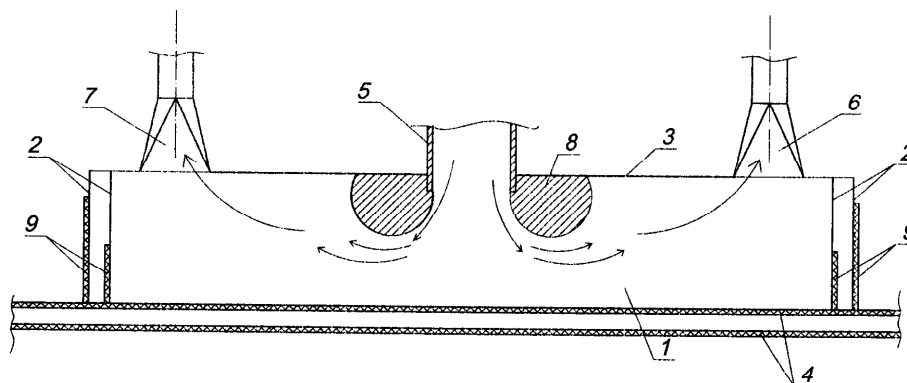
(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 профессионального образования
 "Белгородский государственный
 технологический университет им. В.Г.
 Шухова" (RU)

(54) АСПИРАЦИОННОЕ УКРЫТИЕ МЕСТ ПЕРЕГРУЗКИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

(57) Формула полезной модели

Аспирационное укрытие мест перегрузки сыпучего материала, содержащее короб, образованный торцевыми и боковыми стенками, крышкой, загрузочный желоб, аспирационную воронку и обтекатель, отличающееся тем, что на крышке с противоположной стороны от загрузочного желоба относительно аспирационной воронки установлена дополнительная аспирационная воронка.



RU 161397 U1

RU 161397 U1

Приложение И. Описание полезной модели к патенту RU 142259

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **142 259** (13) **U1**(51) МПК
E21F 5/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014105607/03, 14.02.2014
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:
14.02.2014
 Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 14.02.2014
 (45) Опубликовано: 27.06.2014 Бюл. № 18
 Адрес для переписки:
 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
 им. В.Г. Шухова, отдел создания и оценки
 объектов интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):
 Семиненко Артем Сергеевич (RU),
 Логачев Иван Николаевич (RU),
 Логачев Константин Иванович (RU),
 Аверкова Ольга Александровна (RU),
 Алифанова Алла Ивановна (RU),
 Попов Евгений Николаевич (RU),
 Киреев Виталий Михайлович (RU),
 Гольцов Александр Борисович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
 федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 профессионального образования
 "Белгородский государственный
 технологический университет им. В.Г.
 Шухова" (RU)

(54) АСПИРАЦИОННОЕ УКРЫТИЕ МЕСТ ПЕРЕГРУЗКИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

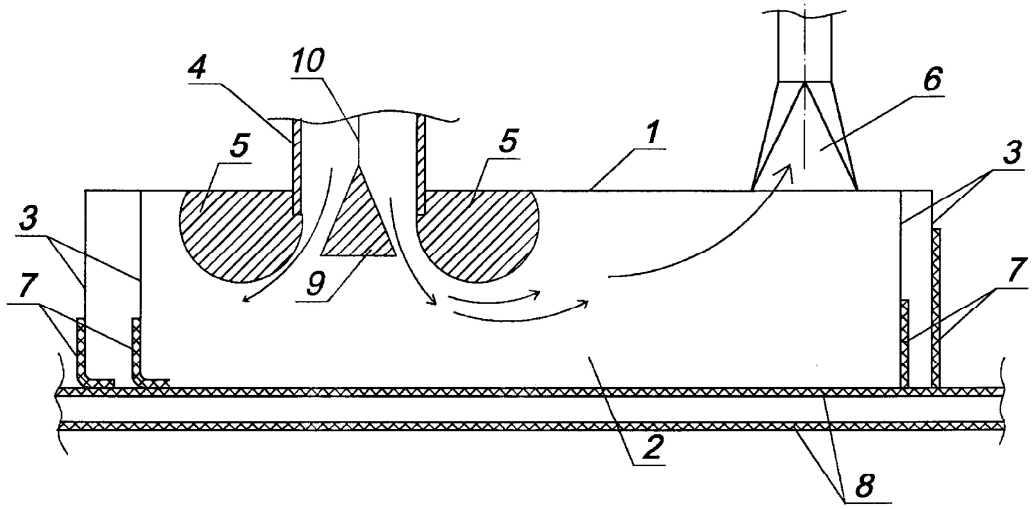
(57) Формула полезной модели

1. Аспирационное укрытие мест перегрузки сыпучего материала, содержащее короб, образованный торцевыми стенками, крышкой и боковыми стенками, расположенными под внутренним углом наклона менее 90° к верхней крышке, эластичные уплотнители, фартуки, закрепленные на торцевых стенках корпуса, аспирационную воронку и загрузочный желоб, отличающееся тем, что крышка содержит обтекатель, установленный у загрузочного желоба.

2. Аспирационное укрытие по п.1, отличающееся тем, что дополнительно содержит разделитель потока, образующий с обтекателем щелевое сопло на выходе из загрузочного желоба.

RU
142259
U1

RU
142259
U1



RU 142259 U1

RU 142259 U1

Приложение К. Описание полезной модели к патенту RU 177236

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **177 236**⁽¹³⁾ **U1**(51) МПК
E21F 5/00 (2006.01)
B65G 21/08 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B65G 21/08 (2006.01); E21F 5/00 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017112163, 10.04.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.04.2017

Дата регистрации:
14.02.2018

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 10.04.2017

(45) Опубликовано: 14.02.2018 Бюл. № 5

Адрес для переписки:
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
им. В.Г. Шухова, отдел создания и оценки
объектов интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):
Овсянников Юрий Григорьевич (RU),
Гольцов Александр Борисович (RU),
Семенов Артем Сергеевич (RU),
Киреев Виталий Михайлович (RU),
Бурьянов Иван Александрович (RU),
Жилина София Сергеевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г.
Шухова" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 161417 U1, 20.04.2016. RU
142259 U1, 27.06.2014. SU 1693260
A1, 23.11.1991. US 5868528 A1, 09.02.1999.

(54) УКРЫТИЕ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ АСПИРИРУЕМОГО ВОЗДУХА

(57) Реферат:

Полезная модель относится к средствам для обеспыливания воздуха при перегрузке сыпучего материала и может быть использована в промышленности строительных материалов, металлургической, горнорудной и др. отраслях народного хозяйства, где имеет место выделение пыли.

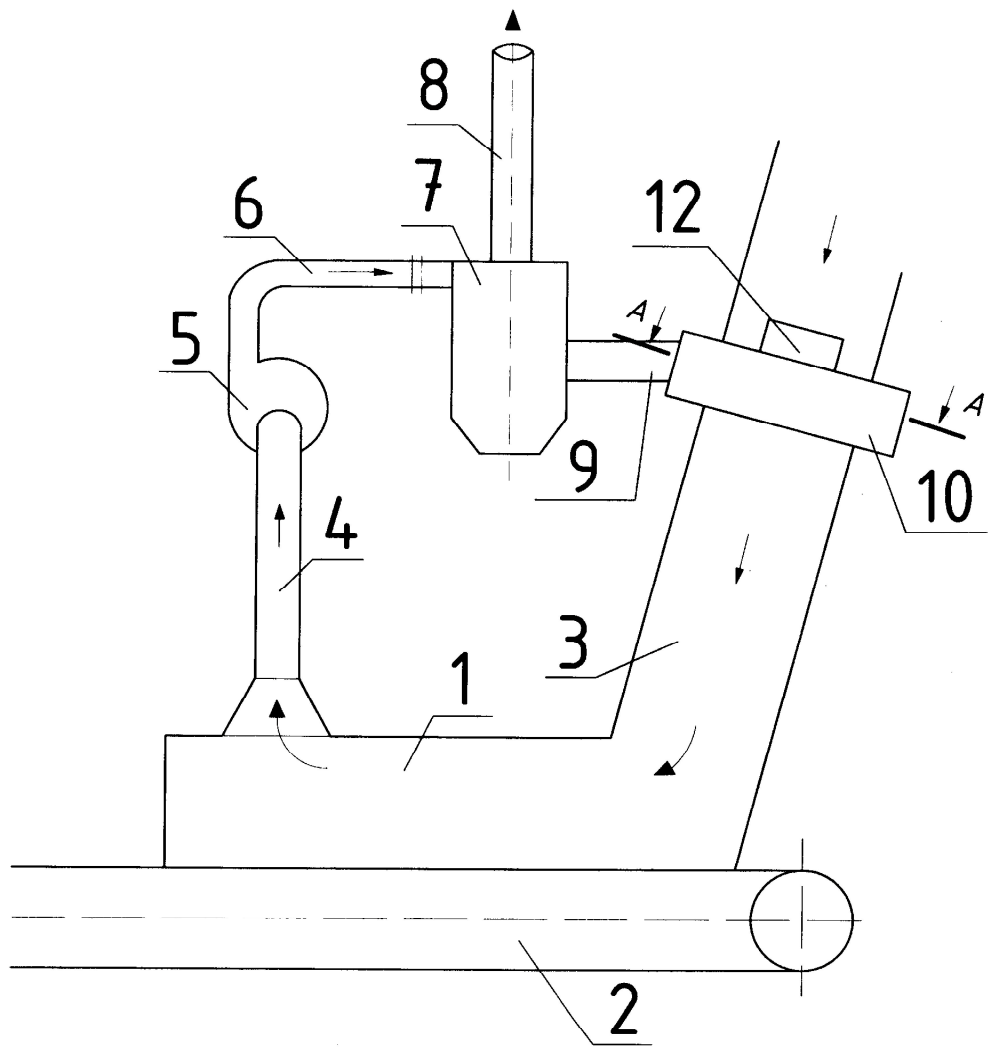
Задачей полезной модели является повышение эффективности ее работы за счет снижения расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом.

Это достигается тем, что укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха включает

короб 1, имеющий возможность соединения с вентилятором и пылеочистительным приспособлением соответствующими патрубками. Распределитель воздушно-пылевого концентрата 10, содержащий воздушные каналы 12 и выполненный в виде кольцевой камеры, опоясывает течку 3, которая соединена с воздушными каналами 12 и жестко закреплена к верхней части короба 1. В предложенном решении воздушные каналы 12 выполнены таким образом, что их форма обеспечивает возникновение эффекта Коанда.

RU 177236 U1

RU 177236 U1



Фиг. 1

RU 177236 U1

RU 177236 U1

Полезная модель относится к средствам для обеспыливания воздуха при перегрузке сыпучего материала и может быть использована в промышленности строительных материалов, металлургической, горнорудной и др. отраслях народного хозяйства, где имеет место выделение пыли.

5 Известно аспирационное укрытие узла перегрузки конвейеров с рециркуляцией аспирируемого воздуха [авт. св. на изобретение СССР № 1693260, МПК⁸ E21F 5/00, B65G 21/00, Подгорнев И.А., Овсянников Ю.Г., Трищенко С.А., Лапин О.Ф., Минко В.А., 23.11.91], включающее верхний и нижний короба, сообщенные между собой течкой, 10 вентилятор, сообщенный с пылеочистительным приспособлением и с аспирационным патрубком нижнего короба, обводную трубу и патрубок отвода очищенного воздуха, также укрытие снабжено распределителем воздушно-пылевого концентрата, размещенным в поперечном сечении течки, при этом пылеочистительное приспособление 15 выполнено в виде циклона-пылеконденсатора, один выход которого сообщен с патрубком отвода очищенного воздуха, а с другой через обводную трубу соединен с распределителем воздушно-пылевого концентрата, причем напорный патрубок вентилятора соединен с входом циклона-пылеконденсатора.

Недостатком этого технического решения является низкая эффективность работы аспирационного укрытия, вследствие высокого расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом при движении по течке.

20 Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату, принятым за прототип, является укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха [патент на полезную модель № 161417, РФ, МПК B65G 69/18, E21F 5/00, Гольцов Александр Борисович, Овсянников Юрий Григорьевич, Семиненко Артем Сергеевич, Емельянов Алексей Викторович, 20.04.16], содержащее короб, к верхней части которого жестко 25 прикреплена течка и аспирационный патрубок. К аспирационному патрубку последовательно присоединены вентилятор, напорный патрубок, пылеочистительное приспособление, один выход пылеочистительного приспособления соединен с патрубком отвода очищенного воздуха, а другой выход через обводную трубу соединен с 30 распределителем воздушно-пылевого концентрата. Распределитель воздушно-пылевого концентрата выполнен в виде кольцевой камеры, опоясывающей течку, содержит воздушные каналы, соединенные с течкой.

С существенными признаками полезной модели совпадает следующая совокупность признаков прототипа: короб, имеющий возможность соединения с вентилятором и 35 пылеочистительным приспособлением соответствующими патрубками, распределитель воздушно-пылевого концентрата, содержащий воздушные каналы и выполненный в виде кольцевой камеры, опоясывающей течку, которая соединена с воздушными 40 каналами и жестко закреплена к верхней части короба.

Недостатком этого технического решения является низкая эффективность работы аспирационного укрытия вследствие высокого расхода воздуха, эжектируемого сыпучим 45 материалом.

Задачей полезной модели является повышение эффективности ее работы за счет снижения расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом при движении по течке.

Это достигается тем, что укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха включает 45 короб, имеющий возможность соединения с вентилятором и пылеочистительным приспособлением соответствующими патрубками. Распределитель воздушно-пылевого концентрата, содержащий воздушные каналы и выполненный в виде кольцевой камеры, опоясывает течку, которая соединена с воздушными каналами и жестко закреплена к верхней части короба. В предложенном решении воздушные каналы выполнены таким

образом, что их форма обеспечивает возникновение эффекта Коанда.

Полезная модель поясняется чертежом: на фиг. 1 показан продольный разрез укрытия с рециркуляцией аспирируемого воздуха; на фиг. 2 - разрез А-А на фиг. 1 (продольный разрез распределителя воздушно-пылевого концентрата); на фиг. 3 - продольный разрез Б-Б на фиг. 2 (поперечный разрез распределителя воздушно-пылевого концентрата).

Укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха включает короб 1, устанавливаемый над приемником перегружаемого сыпучего материала, например, конвейерной лентой 2. К верхней части короба 1 жестко закреплены, например, фланцевыми соединениями, течка 3 и аспирационный патрубок 4. К аспирационному патрубку 4 последовательно присоединены, например, фланцевыми соединениями, вентилятор 5, напорный патрубок 6 пылеочистительное приспособление 7, например, циклон-пылеконцентратор. Один выход пылеочистительного приспособления 7 соединен, например, фланцевым соединением, с патрубком 8 отвода очищенного воздуха, а другой выход через обводную трубу 9 соединен, например, фланцевым соединением, с распределителем 10 воздушно-пылевого концентрата. Распределитель 10 воздушно-пылевого концентрата выполнен в виде кольцевой камеры 11, опоясывающей течку 3. При этом распределитель содержит Коандовские воздушные каналы 12, сообщающиеся с течкой 3 и соединенные с ней, например, сваркой. Коандовские воздушные каналы 12 выполнены криволинейной формы, содержащей выпуклую криволинейную поверхность, таким образом, что их форма обеспечивает возникновение эффекта Коанда.

Укрытие работает следующим образом.

При перегрузке, например, с конвейера (на фиг. не показан) в короб 1 сыпучий материал, например, железная руда, движется по течке 3, эжектируя воздух, создает воздушный запыленный поток. При падении сыпучего материала на конвейерную ленту 2 создается зона повышенного давления. Для обеспечения санитарно-гигиенических условий мест перегрузки сыпучего материала, т.е. не выбивания воздушного запыленного потока, из короба 1 вентилятором 5 через аспирационный патрубок 4 отсасывается воздух, который поступает по напорному патрубку 6 на вход пылеочистительного приспособления 7 для выделения воздушно-пылевого концентрата. Очищенный воздух по патрубку 8 поступает в атмосферу или в следующую ступень очистки (на фиг. не показана), а воздушно-пылевой концентрат благодаря обводной трубе 9 отводится в распределитель 10 воздушно-пылевого концентрата. Распределитель 10 воздушно-пылевого концентрата, выполненный в виде кольцевой камеры 11, обеспечивает подачу воздушно-пылевого концентрата в течку 3 через Коандовские воздушные каналы 12. При этом за счет их криволинейной формы, содержащей выпуклую криволинейную поверхность, обеспечивается возникновение эффекта Коанда, поток воздушно-пылевого концентрата «прилипает» к течке 3, что позволяет, по сравнению с прототипом и аналогом, увеличить угол между направлениями движения воздушно-пылевого концентрата и воздушного запыленного потока, движущегося в течке. Это объясняется тем, что с одной стороны струи воздушно-пылевого концентрата поверхность течки 3 препятствует свободному поступлению воздушного запыленного потока, а с другой стороны струи увлекается часть воздушного запыленного потока. В результате чего повышается аэродинамическое сопротивление течки 3, что обеспечивает снижение расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом при движении по течке 3, следовательно, уменьшается значение давления в зоне падения сыпучего материала на конвейерную ленту, а также объемы аспирируемого воздуха и пылевых выбросов в атмосферу.

Применение укрытия с рециркуляцией аспирируемого воздуха позволит повысить

RU 177 236 U1

энергоэффективность системы местной вытяжной вентиляции за счет снижения расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом при движении по течке и расхода аспирационного воздуха. Кроме того, снижение расхода аспирационного воздуха обеспечит уменьшение газопылевой нагрузки на пылеочистительное приспособление и вентилятор, в результате чего снизится энергопотребление системы.

(57) Формула полезной модели

Укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха, включающее короб, имеющий возможность соединения с вентилятором и пылеочистительным приспособлением соответствующими патрубками, распределитель воздушно-пылевого концентрата, содержащий воздушные каналы и выполненный в виде кольцевой камеры, опоясывающий течку, которая соединена с воздушными каналами и жестко закреплена к верхней части короба, отличающееся тем, что воздушные каналы выполнены таким образом, что их форма обеспечивает возникновение эффекта Коанда.

15

20

25

30

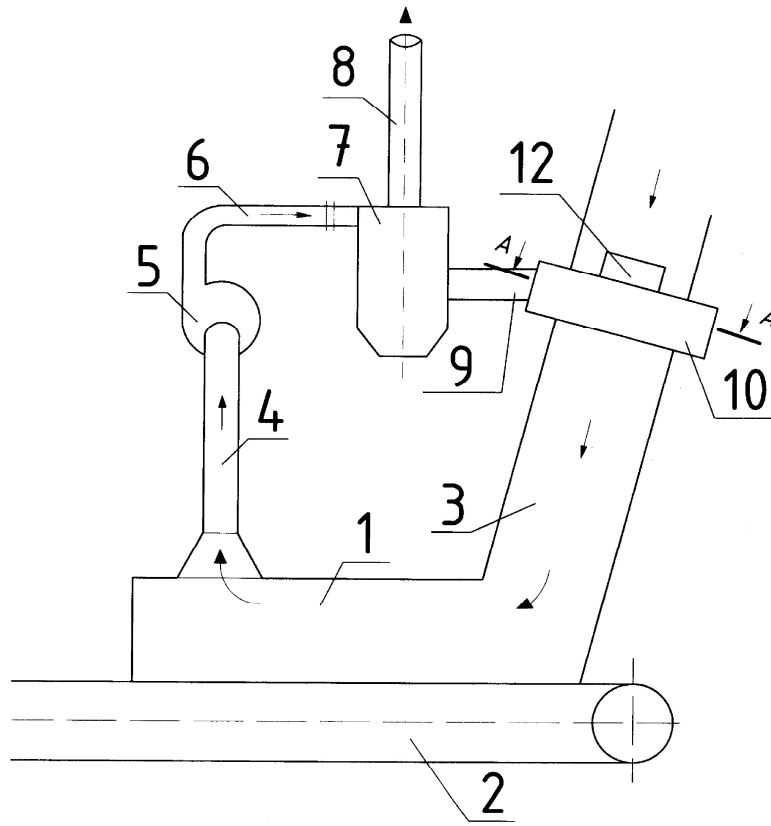
35

40

45

1

1
Укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха



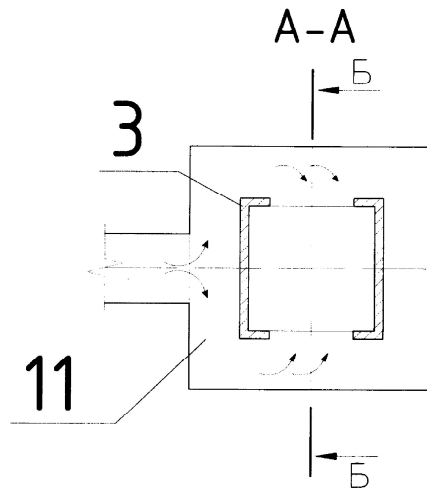
Фиг. 1

2

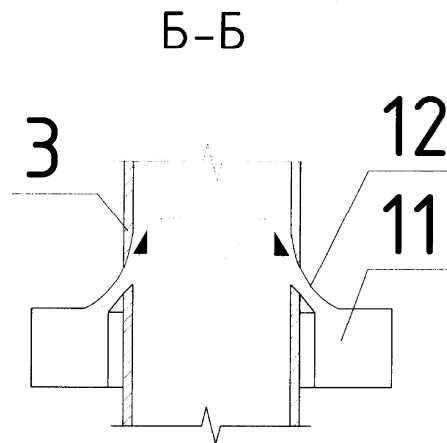
RU 177 236 U1

2

Укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха



Фиг. 2



Фиг. 3

Приложение Л. Копии документов о внедрении результатов диссертационного исследования

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ЗАО «Белгородский цемент»



Хлудеев В.И.

« 3 » ноября 2011 г.

АКТ

опытно-промышленных испытаний устройства для снижения
пылеобразования при загрузке сыпучих материалов

Опытно-промышленный образец устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов, разработанный на основе исследований, проведенных Семеновым А.С. под научным руководством доктора технических наук, проф. Логачева И.Н., новизна конструкции подтверждена свидетельством РФ на полезную модель № 48318 авторы Логачев И.Н., Овсянников Ю.Г., Семенов А.С. и др. (копия свидетельства прилагается), испытан с 17.10.2011г. по 31.10.2011г. в условиях загрузки цементного силоса, входящего в состав блока из четырех силосов диаметром 6 м ЗАО «Белгородский цемент».

Цель испытаний – определение эксплуатационно-технических характеристик устройства для снижения пылеобразования в условиях загрузки цементного силоса системой пневмотранспорта.

Устройство состоит конусообразного разделителя потока и тороидальной поверхности, соосно расположенных таким образом, что сопло, образованное ими, служит каналом для подачи цемента в бункер. Устройство крепится на крышке бункера соосно с загрузочным отверстием.

Испытаниями установлено, что устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов работоспособно и обеспечивает более качественную загрузку бункера.

Конструкция устройства показала свою функциональную завершенность, однако в результате исследований были предложены два узла, требующие доработки и модернизации.

На основании проведенных испытаний устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов пригодно для эксплуатации, является перспективной конструкцией и рекомендуется с доработкой к внедрению в промышленных условиях для транспортирования и хранения мелкодисперсных материалов.

Начальник цеха упаковки
ЗАО «Белгородский цемент»



Федирко И.М.

От разработчиков оборудования:



Логачев И.Н.



Семенов А.С.

Утверждаю

Директор ООО «Полимарк»

 Староверов С.В.

«26» апреля 2017 г.

АКТ

о внедрении в производство результатов диссертационной работы

Семенов Артема Сергеевича

Комиссия в составе:

председатель – главный инженер Пагин А.В.




члены комиссии – к.т.н., доцент Овсянников Ю.Г., ст. пр. Семенов А.С.

составили настоящий акт о том, что при разработке проектной документации систем обеспыливающей вентиляции цеха водосодержащих эмульсий филиала ООО «Тиккурила» по адресу: Белгородская обл., г. Старый Оскол, ул. Мебельная, 26 были использованы результаты диссертационной работы "Повышение эффективности систем вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов" соискателя ФГБОУ БГТУ им. В.Г. Шухова Семенов А.С.

Семенов А.С. предложены и разработаны конструкции загрузочных узлов бункеров, а также системы аспирации диссольтверов шпаклевки и мобильного бункера, в частности переточные каналы, объединяющие полости близстоящих диссольтверов, а также аналог устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов (патент 48318 RU)

Положительным эффектом от применения результатов исследований при проектировании систем местной вентиляции для диссольтверов шпаклевки «ПБ» и узла загрузки мобильного бункера является снижение запыленности на рабочих местах непосредственно у указанных аппаратов с 15,59 мг/м³ до 8,48 мг/м³.

Члены комиссии

Пагин А.В.

Овсянников Ю.Г.

Семенов А.С.