

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**



На правах рукописи

Шеметова Ольга Михайловна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
ВЕРМИКУЛИТ СОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ**

Специальность 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

канд. техн. наук, доц.

Фадин Ю. М.

Белгород, 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИКИ СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ	12
1.1 Характеристика и классификация сухих строительных смесей	12
1.2 Анализ состояния и совершенствования техники для перемешивания сухих строительных материалов	15
1.3 Направление совершенствования пневматических смесителей	21
1.4 Существующие методики расчета пневматических смесителей	27
1.5 Предлагаемая конструкция пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой	30
1.6 Цель и задачи исследований	32
1.7 Выводы	33
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СУХИХ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ СМЕСИТЕЛЕ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ.....	34
2.1 Основные предпосылки и положения.....	34
2.2 Математическое описание движения воздушной среды в цилиндрической камере пневматического смесителя	35
2.3 Описание процесса смешивания компонентов сыпучего материала в пневматическом смесителе	46
2.4 Определение конструктивно-технологических параметров пневматического смесителя.....	53
2.5 Выводы	59
3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ СМЕСИТЕЛЕ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ	61
3.1 Основные положения методики экспериментальных исследований	61
3.2 Описание экспериментальной установки, средств ее контроля и измерения	

параметров	62
3.3 Физико-механические свойства материала, используемого при проведении исследований	69
3.4 Описание методики проведения экспериментов	72
3.4.1 Определение прочности готового продукта.....	72
3.4.2 Определение критерия качества смеси.....	74
3.5 Методология планирования экспериментальных исследований	75
3.6. Выводы	79
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ	80
4.1 Обоснование выбора функций отклика и основных факторов	80
4.2 Анализ зависимости производительности от основных параметров пневматического смесителя	83
4.3 Анализ зависимости коэффициента неоднородности готовой смеси от основных параметров пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой	93
4.4 Анализ зависимости предела прочности готового продукта на сжатие от основных параметров пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой	101
4.5 Определение рациональных параметров процесса смешивания в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой	110
4.6 Сравнение результатов лабораторных экспериментов и теоретических расчетов	113
4.7 Выводы	114
5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	117
5.1 Промышленная апробация результатов работы	117
5.2 Внедрение результатов работы в учебный процесс	121
5.3 Инженерная методика расчета конструкторско-технологических параметров пневматического смесителя	121
5.4 Техничко-экономические результаты работы.....	123

5.5 Выводы	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	128
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	133
ПРИЛОЖЕНИЯ	151
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Патент на полезную модель № 204403	151
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Патент на полезную модель № 210920	157
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Патент на полезную модель № 214199	164
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Акт о внедрении результатов работы в учебный процесс	171
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 Выписка из протокола заседания технического совета АО АППК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ»	172
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 Акт о внедрении пневмосмесителя со спиральной энергонесущей трубкой для производства сухих строительных смесей	173
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 Акт о выпуске полупромышленной партии теплоизоляционной смеси	174
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 Расчет экономической эффективности предлагаемой конструкции пневматического смесителя	175

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в строительной промышленности РФ возросла необходимость в разработке новых и рациональном использовании уже существующих материально-сырьевых баз с целью получения перспективных видов строительных материалов. Которые должны быть лучше по качественным характеристикам и более дешевыми по стоимости в сравнение с существующими. На основе этих материалов можно будет разрабатывать новые сухие строительные смеси с улучшенными физико-механическими характеристиками, качество которых будет обеспечиваться правильной дозировкой состава и свойствами материала, входящего в этот состав [1, 28, 40, 48, 58].

Одними из таких являются сухие теплоизоляционные смеси, которые применяются в строительной промышленности для утепления помещений, а спрос на них со временем только возрастает. Одной из технологических проблем при получении композиционных смесей является низкая плотность отдельных компонентов, например, вермикулита и перлита, которая в разы меньше плотности цемента и песка, что существенно затрудняет возможность их смешивания. В связи с чем не всегда целесообразно применять механическое воздействие на частицы, которые при этом воздействии доизмельчаются. Поэтому для получения указанных смесей необходимо использовать смешивание в пневматических смесителях. Процесс распределения частиц в камере смешивания под действием энергоносителя (сжатого воздуха или перегретого пара) в вихревых потоках, движение в вертикальных и в горизонтальных плоскостях позволяет расширить перечень смешиваемых материалов, имеющих разные физико-механические свойства и отличающихся, например по плотности, такие как вспученные вермикулит и перлит [59, 83, 104, 116, 123, 125]. Вихревое смешивание характеризуется высокими скоростями потока или вихря энергоносителя с частицами компонентов в камере смешивания, процесс которого происходит под воздействием динамической энергии.

Интенсивное разнонаправленное перемещение общего объема и каждой отдельной частицы компонентов обеспечивает получение смеси хорошего

качества, которая отличается высокой степенью однородности. Высокие скорости движения частиц компонентов и непрерывное трение друг о друга и стенки камеры приводит к механической активации связывающего комплекса, обеспечивая тем самым улучшение прочностных показателей сухой готовой смеси [7, 16, 25].

Для получения сухих теплоизоляционных смесей с требуемыми физико-механическими характеристиками разработана усовершенствованная конструкция пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой. На основании выполненных математических расчетов и экспериментальных исследований доказана целесообразность и эффективность применения разработанного пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой для смешивания сухих строительных смесей.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросами совершенствования процессов смешивания сухих строительных смесей в течение многих лет, занимались отечественные и зарубежные ученые: Барский М.Д., Богданов В.В., Богданов В.С., Вараксин А.Ю., Горшков П.С., Калинушкин М.П., Малевич И.П., Надеин А.А., Сапожников В.А., Сиваченко Л.А., Серяков В.С., Томченко К. А., Уваров В.А., Шапунов М.М., Dury С.М., Gerick Н.Р., Ristow, G.H. и др. Анализ результатов научных исследований позволил установить круг нерешённых задач, связанных с получением сухих строительных смесей: процесс смешивания неоднородных компонентов и характер их движения в камере смесителя, влияние конструктивно-технологических параметров смесителя на процессы гомогенизации композиционных смесей и оценки ее качества. В связи с ограниченным применением пневмосмесителей, некоторые параметры их работы недостаточно изучены. Например, такие как эффективность воздействия сжатого воздуха на смешиваемые компоненты смеси и дополнительное воздействия сжатого воздуха на сыпучие компоненты для устранения застойных зон.

Объектом исследования является пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой для получения сухих строительных смесей.

Предметом исследования является процесс смешивания вермикулит содержащих смесей в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой.

Цель работы: совершенствование пневматического смесителя, обеспечивающего получение качественных вермикулит содержащих смесей с использованием спиральной энергонесущей трубки.

Задачи исследования:

1. Провести анализ отечественного и зарубежного смесительного оборудования и направлений совершенствования пневматических смесителей.

2. Разработать патентно-чистую конструкцию пневматического смесителя для получения смесей с различными физико-механическими свойствами.

3. Получить аналитические выражения, определяющие компоненты вектора скорости воздушного потока в камере смесителя в зависимости от геометрии цилиндрической камеры пневматического смесителя.

4. Получить аналитическое выражение, описывающее изменение концентрации выделенного компонента смеси сыпучего материала в цилиндрическом объеме камеры смешивания.

5. Разработать методику проведения экспериментальных исследований на пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой, с использованием многофакторного планирования экспериментов, установить закономерности изменения производительности, коэффициента неоднородности и предела прочности экспериментальных образцов.

6. Разработать инженерную методику расчета конструктивно-технологических параметров и рациональные режимы работы пневматического смесителя.

7. Разработать рекомендации для промышленного использования результатов исследования новой конструкции пневматического смесителя.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.5.21 по областям исследования:

1. Разработка научных и методологических основ, технических и технологических требований к проектированию и созданию новых машин, агрегатов и технологических процессов.

9. Разработка научных и методологических основ проектирования и практической реализации технологических процессов и способов получения и обработки материалов, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, формирующих комплекс свойств, качество и расширяющих номенклатуру изготавливаемой продукции.

Научная новизна заключается в получении:

- математической модели изменения движения воздушной среды в цилиндрической камере смешивания в зависимости от конструктивно-технологических параметров пневматического смесителя;

- аналитического выражения, описывающего изменение концентрации выделенной компоненты смеси сыпучего материала в зависимости от изменения конструктивно-технологических параметров пневматического смесителя;

- уравнений регрессии, определяющих изменение производительности, коэффициента неоднородности и предела прочности на сжатие экспериментальных образцов от конструктивно-технологических параметров разработанного пневматического смесителя.

Практическая значимость работы:

На основании проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработана и запатентована конструкция пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой. Пневматический смеситель обеспечивает получение вермикулит содержащих смесей с коэффициентом однородности 85-96%. Реализована производственная апробация результатов работы на пневматическом смесителе для получения сухих теплоизоляционных смесей на предприятии АО "АППК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ»". Разработанная методика расчета патентно-защищенной конструкции пневматического смесителя используется при подготовке студентов по направлениям 15.03.02-21-

Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов и
15.05.01-24 - Проектирование технологических машин и комплексов.

Методы исследования.

В диссертационной работе использовались следующие теоретические и экспериментальные методы: математического анализа и статистики, многофакторного планирования эксперимента ПФЭ ЦКРП 2⁴, физического и имитационного моделирования, лабораторного эксперимента, сравнения экспериментальных и теоретических результатов, визуального наблюдения.

Автор защищает:

1. Математическую модель движения воздушной среды в цилиндрической камере смешивания в зависимости от конструктивно-технологических параметров пневматического смесителя.

2. Аналитические выражения, описывающие изменение концентрации выделенной компоненты композиционной смеси в зависимости от варьируемых конструктивно-технологических параметров пневматического смесителя.

3. Результаты экспериментальных исследований процесса изменения коэффициента неоднородности сухой теплоизоляционной смеси при ее смешивании в пневматическом смесителе, предела прочности на сжатие экспериментальных образцов из полученной смеси и производительности пневматического смесителя.

4. Конструкцию пневматического смесителя для сухих строительных смесей, подтвержденную патентом РФ на полезную модель.

Реализация работы:

Разработаны рекомендации для промышленного внедрения пневматического смесителя на технологическую линию АО "АППК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ» (г. Белгород). Результаты работы используются в учебном процессе при выполнении курсовых и дипломных работ на кафедре механического оборудования БГТУ им. В. Г. Шухова.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций соответствует необходимым предъявляемым требованиям к диссертационной

работе, обоснованы применением точных контрольно-измерительных и вычислительных приборов, основополагающих принципов и фундаментальных законов, подтверждаются согласованностью теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными в ходе проведения лабораторных экспериментов и положительным результатом промышленной апробации пневматического смесителя.

Апробация работы. Диссертационная работа выполнялась в БГТУ им. В.Г. Шухова в рамках научно-исследовательских работ. Результаты диссертационной работы рассмотрены и одобрены на заседании кафедры механического оборудования.

Основные результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: в финальном отборе программы поддержки талантливой молодежи «УМНИК» 2022 (Белгород), международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им В.Г. Шухова 2020, 2021, 2022 (Белгород), международной научно-технической конференции молодых ученых «Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов» 2020, 2021, 2022 (Белгород), национальной конференции «Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии» 2021 (Белгород), международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» 2021, 2022 (Могилев), международном молодежном форуме «ОБРАЗОВАНИЕ. НАУКА. ПРОИЗВОДСТВО» 2021, 2022 (Белгород), XV международной научно-практической конференции «Молодежь и научно-технический прогресс» 2022 (Губкин).

Публикации. По результатам работы опубликована **31** статья, в том числе 6 в рецензируемых изданиях, включённых в Перечень ВАК РФ, 3 в рецензируемых изданиях, включённых в Перечень Scopus, 22 статьи в научных журналах, индексируемых в РИНЦ. Получено 3 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержащего основные выводы, рекомендации и направления

дальнейших исследований. Работа включает 150 страниц машинописного текста, 7 таблиц, 68 рисунков, список литературы из 151 наименования.

1. СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИКИ СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Характеристика и классификация сухих строительных смесей

Изучение и создание сухих строительных смесей (ССС) начинается с момента, когда впервые был добавлен портландцемент [41]. С появления в XIX веке на строительном рынке цемента и до настоящего времени ассортимент сухих строительных смесей значительно увеличился, но и в настоящее время появляются новые образцы с улучшенными качественными характеристиками. Происходило развитие СССР в несколько этапов изменения состава [49, 59]. Одним из этапов были полимермодифицированные СССР. Во время этого этапа в смесь добавляли клей ПВА, который формировал гибкие пленки-мостики между частицами, и снижал часть нагрузки при растяжении. Следующий этап начинался с 1960-х годов, где было сделано добавление редиспергируемых полимеров, которые при добавлении воды не выделяли бы вредные компоненты. Без использования современных модифицированных СССР строительство и восстановление зданий будет проходить затруднительно [53, 54].

Основные преимущества применения СССР в сравнении с традиционными составами [58]:

- легкое и простое использование в работе;
- компоненты смеси строго дозированы, смесь стабильно однородна и постоянна по составу;
- экономичность материала (наносится более тонким слоем);
- за счет адгезивности материала можно обрабатывать различные поверхности, не боясь некачественного сцепления материала с поверхностью;
- за счет пластичности готовой СССР можно наносить раствор на различные поверхности;
- СССР могут долгосрочно храниться в упаковке и не утратить своих рабочих характеристик.

С появлением ССС на рынке композиционных материалов они имели высокую стоимость, но с течением времени ценовая политика начала снижаться за счет появления большой конкуренции фирм производителей. В результате чего на сегодняшний день мы имеем гибкий характер ценообразования и большой ассортимент продукции [60, 63, 106]. Рынок ССС подразделяется на несколько категорий:

- дорогая импортная продукция;
- отечественные производители со средней ценовой политикой и использованием импортных компонентов смеси;
- смеси российского производства на современных отечественных составляющих.

В рамках последних тенденций программ по импортозамещению рассмотрим последнюю категорию смесей, которая устраивает нас по следующим факторам: приемлемая цена, достойное качество и широкий спектр выбора [29, 64].

Сухие строительные смеси можно классифицировать по нескольким направлениям (рисунок 1.1) [4, 49, 70]. Они производятся на технологических линиях с перемешиванием вяжущих (цемент или гипс) и наполнителей (песок). Процентное соотношение компонентов в смесях составляет: основной компонент (60-80%), вспомогательный (37,5-17,5%); модифицирующие добавки - 0,5-2%; микродобавки - 0,5% [38, 41, 45, 56, 65, 66].

Выбор связующего компонента определяет сроки затвердевания и эксплуатационные характеристики продукта: влажностный режим работы, стойкость с учетом переменных температур, высыхание и т. д. ССС применяют для обширного спектра отделочных работ (таблица 1.1).

Таблица 1.1

Состав сухих строительных смесей

Минеральные вяжущие	Заполнители	Модифицирующие добавки
Портландцемент	Песок	Водоудерживающие
Гипс	Известняк	Пластифицирующие
Известь	Керамзит	Воздухововлекающие
	Вермикулит	Регуляторы твердения
	Перлит	Уплотняющие

Минеральные вяжущие	Заполнители	Модифицирующие добавки
	Пеностекло	Регуляторы пенообразования
	Пенополистирол	

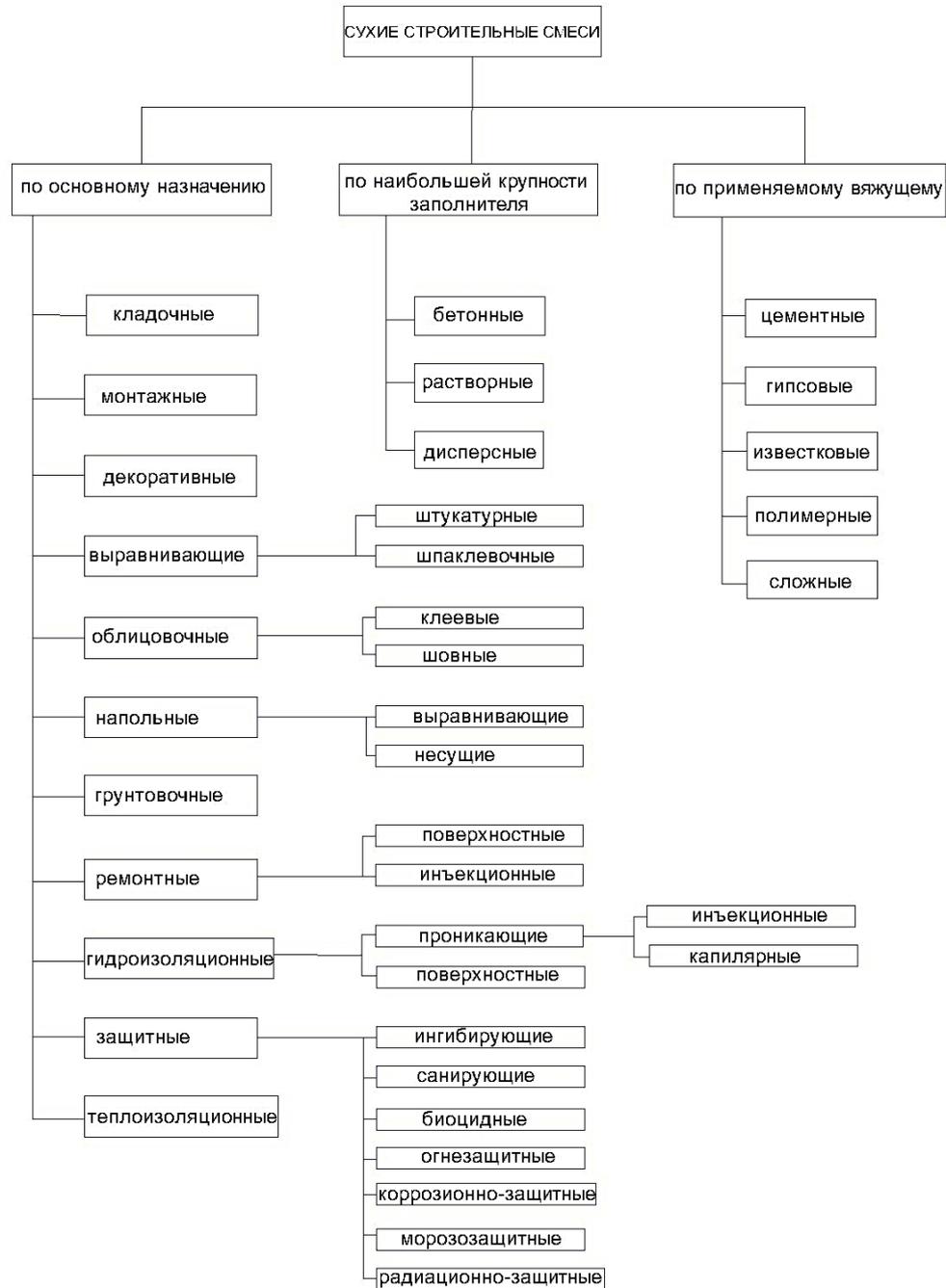


Рисунок 1.1 Классификация ССС

Последние несколько лет растет спрос на теплоизоляционные материалы, к которым относятся смеси с низкой теплопроводностью и применяемые для тепловой изоляции строительных конструкций. Такие смеси можно использовать

на фасадах зданий, представляющих историческую ценность и вид которых изменять нельзя. В их состав для получения теплоизоляционных свойств входят гранулы пенополистирола или вспученное стекло, но наиболее часто применяется вспученный перлит или перлит, за счет его экологичности, низкой стоимости, широкого диапазона рабочей температуры и низкого коэффициента теплопроводности. Смеси с перлитовым наполнителем отличаются низкой теплопроводностью и паропроницаемостью. В качестве добавок применяют пластификаторы, гидрофобизирующие и воздухоовлекающие компоненты, при применении которых создаются воздушные поры, увеличиваются теплоизоляционные свойства, уменьшается плотность, увеличиваются звукоизоляционные свойства. Такие смеси удобны тем, что для работы с ними не требуется специальное образование, особые инструменты и приспособления, а наносить их можно как вручную, так и машинным способом. Показателями, отвечающими за качество сухой теплоизоляционной смеси и готового продукта из нее, служат коэффициент неоднородности, предел прочности на сжатие и плотность. Основным процессом для приготовления такой сухой смеси и получения требуемых характеристик служит процесс смешивания, и чем правильнее подобран смесительный агрегат, тем лучше будут показатели смеси [3, 51, 53, 78, 80, 83, 121, 122].

1.2 Анализ состояния и совершенствования техники для перемешивания сухих строительных материалов

Во время подбора смесительного агрегата или способа смешивания необходимо ориентироваться на следующие аспекты:

- необходимая степень смешивания (степень равномерного распределения) компонентов двух и более веществ после окончания процесса смешивания;

- интенсивность смешивания, которая определяется временем, когда будет достигнут необходимый результат за минимальное количество времени и с наименьшими затратами ресурсов.

Рынок смесительного оборудования довольно разнообразен (рисунок 1.2). На нем представлены смесители от малой производительности до больших производственных объемов. Подбор смесителя нужно начинать с понимания требований к процессу (например, количество одновременно смешиваемых компонентов, необходимая степень смешивания) и свойствам смешиваемого материала (например, гранулометрический состав, форма частиц, абразивность и т.д.). Заключительный выбор смесительного агрегата должен объединить эти факторы с эксплуатационными расходами и затратами на покупку, чтобы прийти к правильному инженерному решению [4, 10, 12, 69, 72].

Работа смесительных агрегатов основывается на различном воздействии на компоненты смеси, например, механическом, струйном, пневматическом, импульсном, вибрационном, ультразвуком, магнитном и т.д.

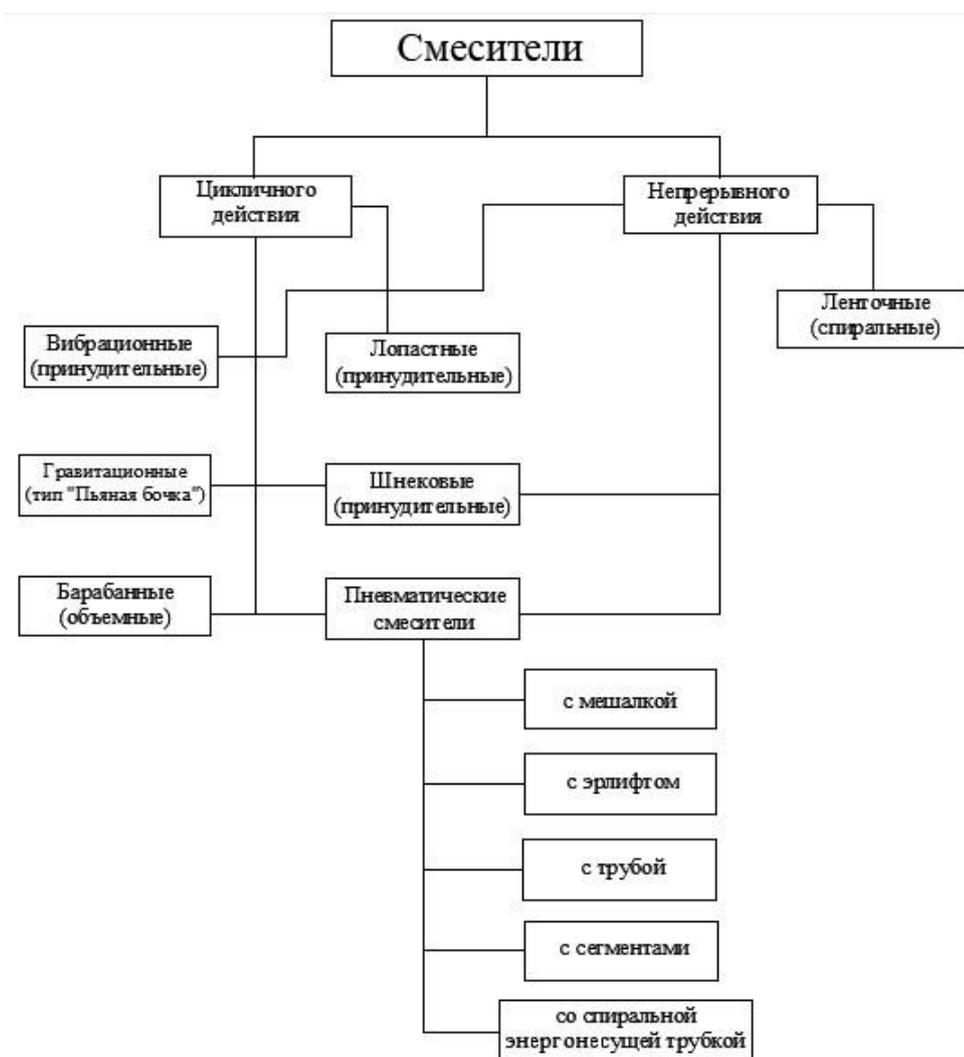


Рисунок 1.2 Виды смесительных агрегатов

Смешивание может происходить двумя способами: периодически и непрерывно. Периодическое смешивание — это смешивание ингредиентов в любом количестве отдельными партиями в индивидуальный резервуар. Все ингредиенты загружаются в смеситель и перемешиваются в течение определенного периода, пока смесь не будет однородной консистенции, затем выгружается. Критическим параметром таких смесителей является продолжительность смешивания, размер и геометрия смесителя, условия эксплуатации. Количество смешиваемых материалов может варьироваться в любом диапазоне, однако, в отличие от непрерывного перемешивания, необходимо следить за тем, чтобы загрузка смесителя осуществлялась в контролируемом режиме [96, 97].

Механический способ смешивания происходит за счет перемещения компонентов материала при помощи различных приспособлений (мешалки, шнеки, лопасти, диски, ленты и т. д.). При этом способе происходит сложное и интенсивное движение материала в камере смешивания. Рассмотрим несколько примеров таких смесителей.

Существуют смесители с неподвижной смесительной камерой (лопастной, червячный, ленточный и т. д.) (рисунки 1.3-1.5), в которой смешиваемый материал перемешивается при помощи механического устройства [27]. При таком способе смешивания компонентов с близкими физико-механическими характеристиками можно получить качественную готовую смесь, за исключением составляющих компонентов с содержанием железа, так как происходит сегрегация частиц в некоторых зонах камеры смешивания. Другим отличительным качеством таких смесителей является преобладание процесса диффузионного смешивания, а значит перераспределение частиц по объему смесительной камеры будет затруднено [47-48]. Увеличение объемов смесителей этого типа вдвое ведет к увеличению мощности привода [69], а наличие вращающего перемешивающего устройства внутри смесительной камеры усложняет конструкцию.

Основное достоинство таких смесителей — это высокая однородность (80-85%) [93]. Недостатки — износ рабочего органа, высокие скорости могут вызвать сегрегацию, и тяжелый продукт будет отбрасывать к периферии, а более легкий продукт направляться в центр смесителя, необходимость защищать движущиеся части смесителя от пыли и очищать рабочую камеру.

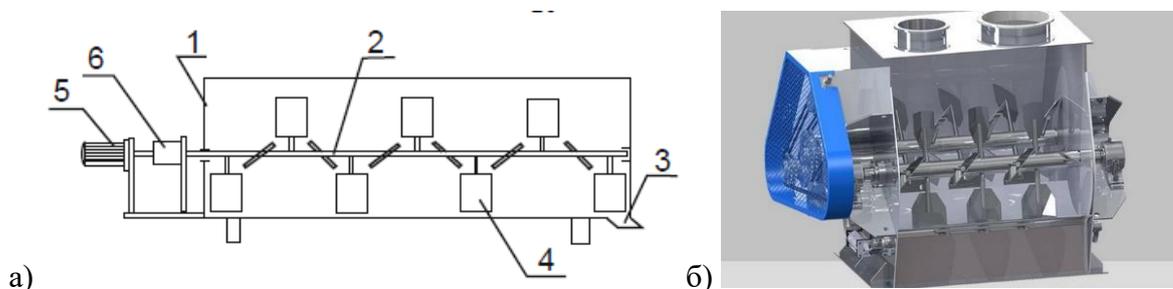


Рисунок 1.3 Лопастной смеситель:

a – кинематическая схема; *б* – общий вид;
 1 – смесительный корпус; 2 – вал; 3 – выгрузочный патрубок; 4 – лопасти;
 5 – электродвигатель; 6 – редуктор

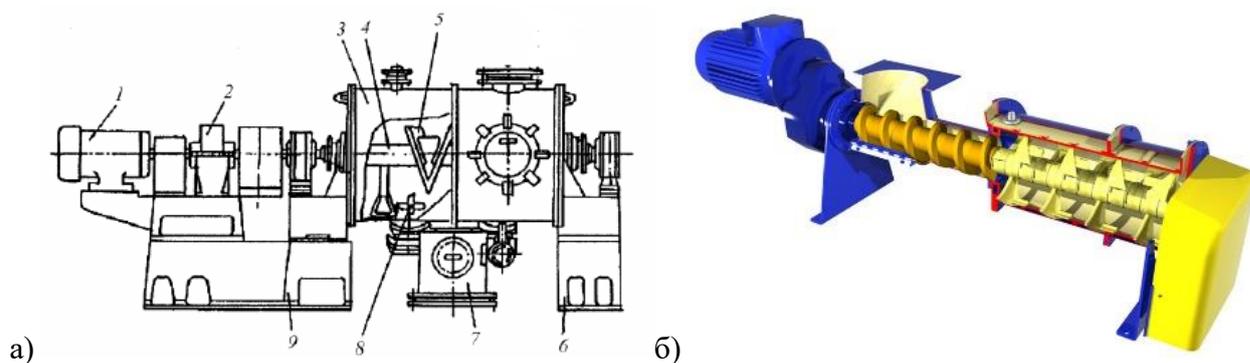


Рисунок 1.4 Червячный смеситель:

a – кинематическая схема; *б* – общий вид;
 1 – электродвигатель; 2 – привод ротора; 3 – корпус; 4 – приводной вал;
 5 – шнек; 6 – подставка; 7 – разгрузочная коробка; 8 – ножевая головка; 9 – станина

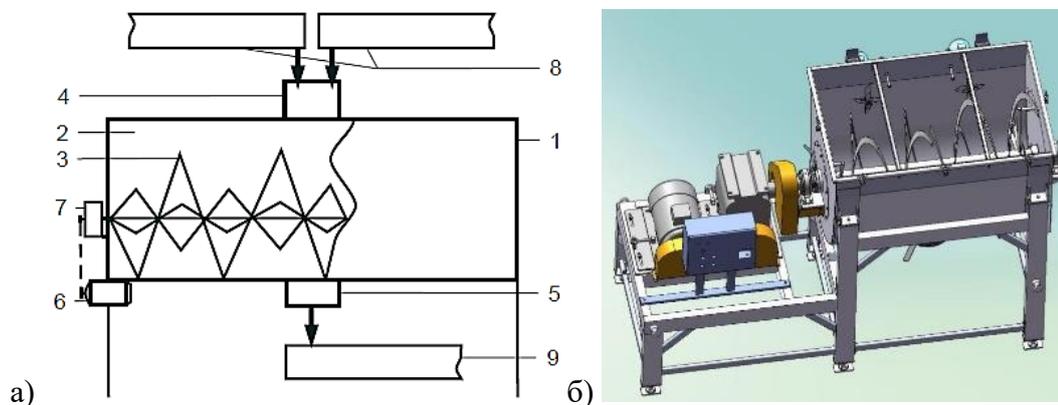


Рисунок 1.5 Ленточный смеситель:

a – кинематическая схема; *б* – общий вид;
 1 – корпус; 2 – камера смешивания; 3 – ленточный шнек; 4 – загрузочный патрубок;
 5 – выгрузочный патрубок; 6 – двигатель; 7 – редуктор; 8 – загрузочный шнек; 9 – выгрузочный шнек

Барабанные смесители с вращающимся корпусом (цилиндрические, двухконусные, U-образные и др.) (рисунки 1.6-1.8) применяются для смешивания дисперсных материалов [81]. Достоинства барабанных смесителей – это простота конструкции смесителя, низкая истираемость материала, возможность создания механизмов с большой разовой загрузкой. Но длительный процесс перемешивания и высокий удельный расход энергии, возрастающий с увеличением объема смесителя, существенно ограничивают сферу их применения.

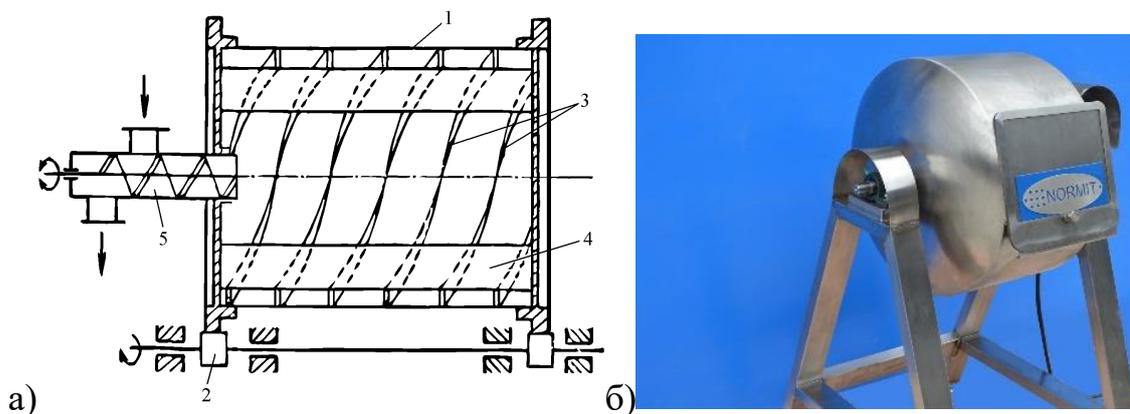


Рисунок 1.6 Цилиндрический барабанный смеситель:
а – кинематическая схема; *б* – общий вид;
 1 – корпус; 2 – опорные ролики; 3 – спиральные ребра; 4 – полки; 5 – шнек

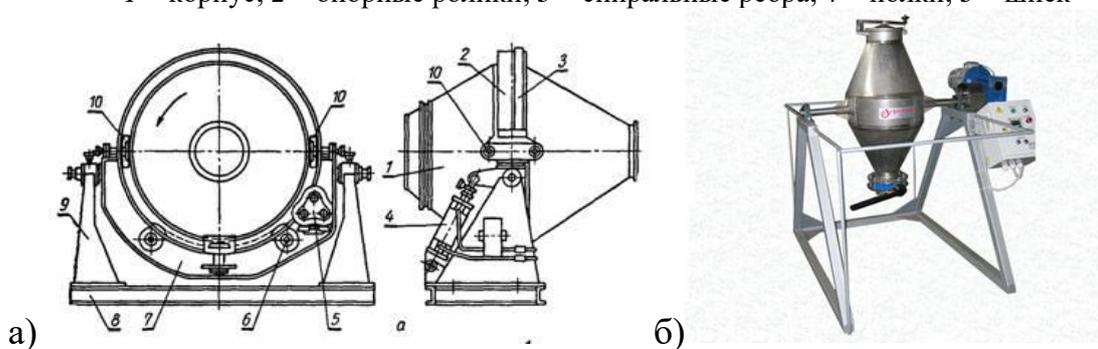


Рисунок 1.7 Двухконусный смеситель:
а – кинематическая схема; *б* – общий вид;
 1 – барабан; 2 – бандаж; 3 – зубчатый венец; 4 – гидроцилиндр;
 5 – редуктор; 6 – ролики; 7 – траверса; 8 – рама; 9 – стойки; 10 – ролики

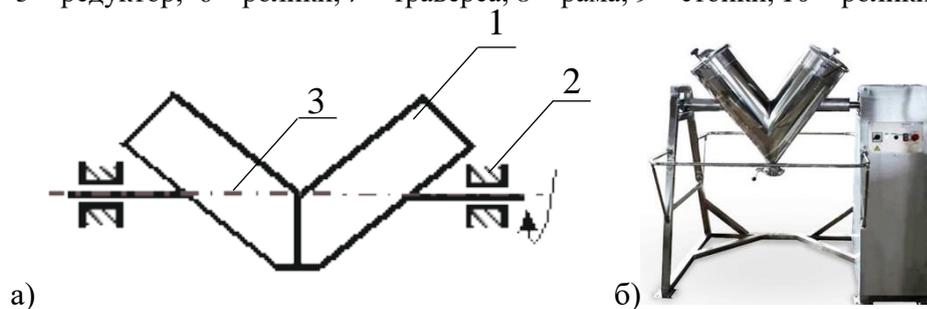


Рисунок 1.8 U-образный смеситель:
а – кинематическая схема; *б* – общий вид;
 1 – корпус; 2 – подшипники; 3 – вал

Процесс смешивания вибрационным способом подходит к любому сухому сыпучему материалу. Смешивание происходит за счет вибрационных импульсов, вызывающих хаотические столкновения и перемещение частичек материала между собой. Степень интенсивности вибрации напрямую зависит от размеров и плотности частиц компонентов смешивания, проницаемости и высоты слоев материала, влажности и коэффициента трения, от геометрических параметров камеры. Процесс смешивания происходит преимущественно за счет механизма, вызывающего сложные колебания. На рисунке 1.9 представлена схема вибрационного смесителя, использование которого основывается на применении вибрационного воздействия без внутренних исполнительных органов. Благодаря высокой надежности и простоте конструкции вибросмесители получили широкое применение в промышленности [43, 47-48].

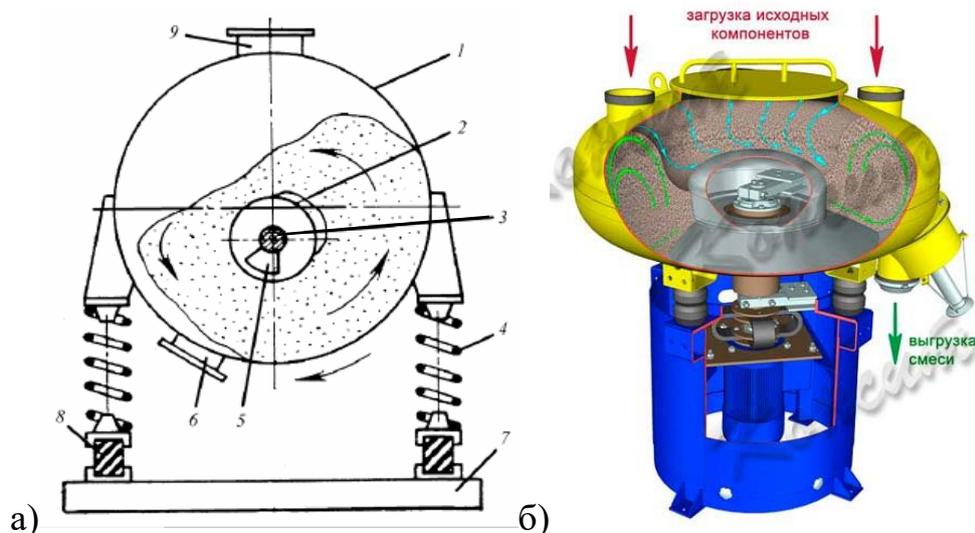


Рисунок 1.9 Вибрационный смеситель:
a – кинематическая схема; *б* – общий вид;
 1 – корпус; 2 – труба; 3 – вал; 4 – пружины;
 5 – дебаланс; 6 – штуцер; 7 – станина; 8 – амортизаторы; 9 – выгрузочный патрубок

Бывают допущения, где в некоторых случаях в таких смесителях используются внутренние направляющие, которые закручивают поток и тем самым улучшают процесс смешивания. Достоинства таких смесителей — это высокая степень однородности сыпучих материалов, за исключением работы с материалами различной плотности, что можно отнести к недостатку данных смесителей.

В пневматических смесителях (рисунок 1.10), работающих по замкнутому циклу, сложно описать процесс смешивания из-за процессов, происходящих в камере, таких как конвективное смешивание (сдвиговые перемещения слоев дисперсной среды из одной зоны смешиваемого объема в другую) или диффузионное смешивание (перемещение отдельных частиц относительно друг друга), или расслоение (сегрегация частиц под действием гравитационных, инерционных, электростатических и других сил) [6, 41].

Коэффициент неоднородности у таких смесителей $V_c = 5-10 \%$, а отсутствие механических частей позволяет пренебречь дополнительными элементами по защите от пыли механизма смешивания. Воздействие энергоносителя на материал, как способ воздействия, позволяет смешивать материалы как с одинаковой плотностью, так и различной без потери качества готового материала.

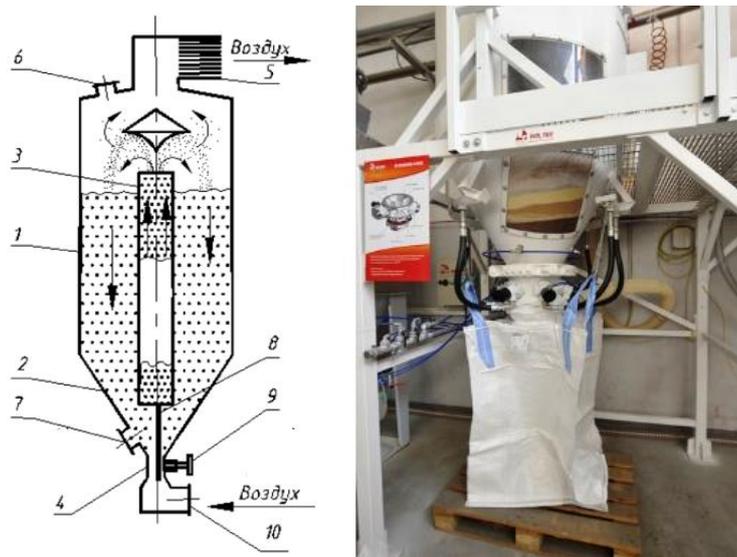


Рисунок 1.10 Пневматический смеситель:
а – кинематическая схема; *б* – общий вид;
1 – корпус; *2* – днище; *3* – труба; *4* – сопло; *5* – пылеотделитель;
6,7 – люки загрузки и выгрузки; *8* – трубка; *9* – рычаг; *10* – подача воздуха

1.3 Направление совершенствования пневматических смесителей

Пневматические смесители соответствуют экологическим и производственным стандартам, не вредят здоровью работников, не уступают механическим смесителям по техническим показателям. Пневматическое смешивание является малоизученной областью. Обозначим направления для

изучения этого способа: разработка или совершенствование эффективной камеры смешивания; получение технологического процесса смешивания сухих многокомпонентных смесей. Согласно разработкам пневматических смесителей и расчетов для получения однородной смеси, можно разработать универсальный пневматический смеситель с достижением неоднородности готовой смеси до 5-10 % и возможностью качественного перемешивания компонентов, разных по плотности и размерам частиц, а также большой удельной поверхностью [58, 74].

Смешивание в пневматическом смесителе происходит за счет энергоносителя, поступающего в корпус смесителя, где он, встречаясь с материалом, перемещается в хаотично-вихревом порядке и создает перемещение не только всего объема смеси, но и отдельных частиц, перемешивая их друг с другом. Это обеспечивает получение качественной смеси, с высоким процентным содержанием однородности распределения компонентов [14, 81]. После процесса пневматического смешивания энергоноситель с частичками пыли уходит на пылеразделение и очистку в циклон, а затем в рукавные фильтра. Пневматическое смешивание отличается высокими скоростями энергоносителя для смешивания компонентов смеси [129, 138]. Рассмотрим подробнее достоинства данного вида смесителей: простота конструкции, возможность одновременно смешивать большие объемы и компоненты с разными физико-механическими и прочностными свойствами, малое истирание поверхности. Такой смеситель может работать как периодически, так и непрерывно. У таких смесителей малое время смешивания (от 10 с), за счет воздействия вихревого потока энергоносителя на смешиваемые компоненты. Столько же времени необходимо для оседания мелкодисперсных частичек после окончания работы смесителя [137]. Рассмотрим несколько видов пневматических смесителей [98, 105].

Пневматические смесители имеют различные конструктивные решения (рисунки 1.11, 1.12), например, пневматический смеситель с добавочной мешалкой (рисунок 1.11, а), который в своей конструкции использует комбинированное воздействие на компоненты (пневматическое и механическое);

пневматический смеситель по принципу аэрлифта (рисунок 1.11, б), который проводит смешивание за счет гравитационных сил, а для подъема использует вертикальную аэротрубу; пневматический смеситель с вращающимся воздухораспределителем (рисунок 1.11, в), который использует вращение сопел подачи энергоносителя, что позволяет интенсивнее осуществлять процесс смешивания [136, 138].

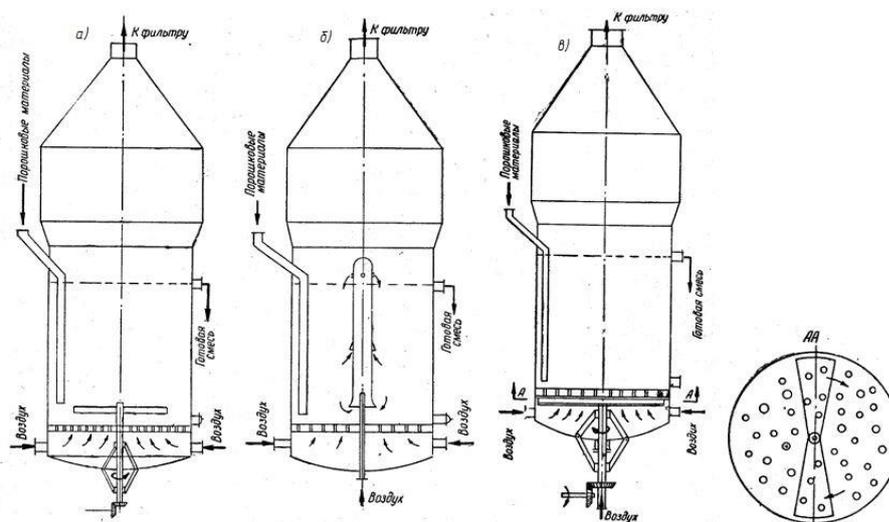


Рисунок 1.11 Схемы пневматических смесителей:

а – пневматический смеситель с добавочной мешалкой; б – пневматический смеситель по принципу аэрлифта; в – пневматический смеситель с вращающимся воздухораспределителем

Пневматический смеситель с регулируемым потоком воздуха показан на рисунке 1.12, а, пневматический смеситель с разделенной сегментами регулируемой камерой смешивания на рисунке 1.12, б. Отличие пневматического смесителя с трубой (рисунок 1.12, в) от остальных состоит в установленной центральной вытяжной трубе, с помощью которой происходит повышение эффективности процесса смешивания [142].

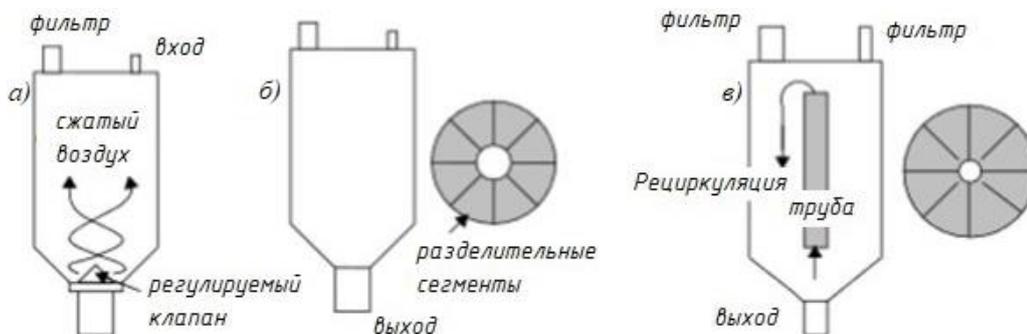


Рисунок 1.12 Схемы пневматических смесителей:

а – пневматический смеситель с клапаном; б – пневматический смеситель с сегментами; в – пневматический смеситель с трубой

Зона смешивания расположена в центре камеры смесителя. Компоненты материала в таком виде пневматического смесителя идут вверх по вытяжной трубе, вылетают сверху, а затем улетают с внешней стороны трубы в нижнюю ее часть для рециркуляции. Пневматические смесители используются как в строительной индустрии, так и в нефтехимической, стекольной, фармацевтической и других областях [72].

В НИИ горноспасательного дела предложили разработку пневматического смесителя для повышения качества готового продукта за счет увеличения циркуляции материала (рисунок 1.13) [100]. Материал загружают в загрузочные воронки 18 и 19, при этом сопла 5-8 находятся в закрытом состоянии. Энергоноситель подают через сеть трубопроводов 20 к соплам 5-8, далее по часовой стрелке открывают сопла для того, чтобы создать вихревой поток, который поднимает материал во восходящем вихре во внутренней трубе 4 до конца трубы, где происходит первичное смешивание компонентов. Далее за счет центробежной силы, после выхода с внутренней вертикальной трубы, материал отбрасывается к периферии корпуса 1, а запыленный воздух выходит через систему аспирации, которая включает в себя циклон с рукавными фильтрами 15.

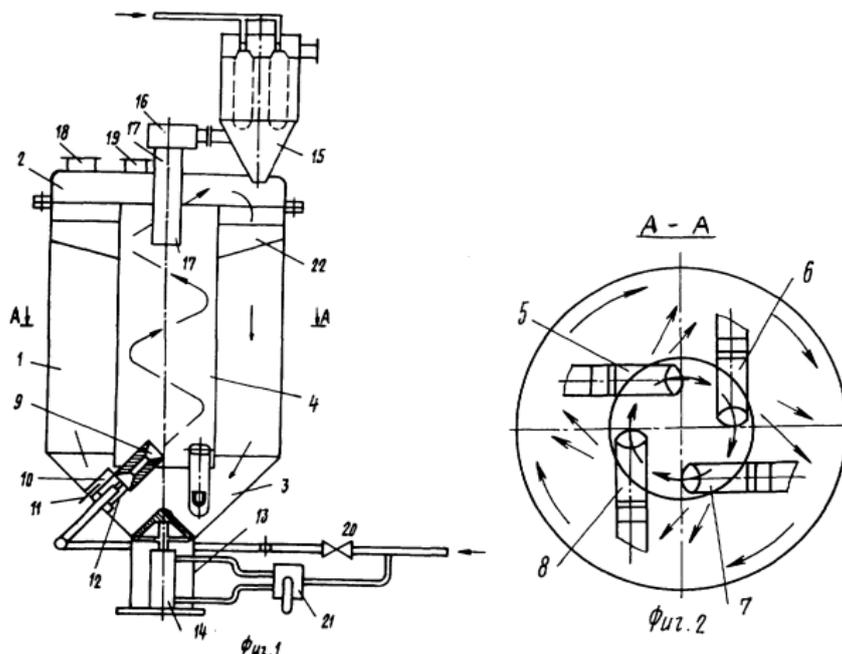


Рисунок 1.13. Пневматический смеситель с дополнительными соплами:
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – днище; 4 – труба; 5 – 8 – сопла; 9 – диффузор; 10 – шибер;
 11 – загрузочная камера инжектора; 12 – окно; 13 – выгрузочный патрубок; 14 – пневмоцилиндр;
 15 – циклон; 16 – улитка; 17 – труба; 18 - 19 – загрузочные воронки; 20 – вентиль;
 21 – четырехходовый кран; 22 – ребра

Разгрузка происходит после того, как перекрывают нижнюю часть камеры шиберами 10, и материал под разрежением разгружается через циклон 15. В результате тангенциального расположения сопел 5-8 уменьшаются пассивные зоны. Наличие сепарационных устройств обеспечивает многократную циркуляцию смеси через обечайку и улучшается эффект перемешивания. Недостатком данной установки является большой перерасход энергоносителя.

Смесители производства NOL-TEC (рисунок 1.14) работают с материалом крупности частиц не более 6 мм [144].



Рисунок 1.14 Пневмосмеситель NOL-TEC

На данный период времени пневматические смесители NOL-TEC используются для смешивания ССС, а также в химической промышленности. Технические характеристики: загрузка до 30 кг; расход воздуха 0,007 м³/с; давление энергоносителя 0,151 МПа; время смешивания 5 мин.

Компания Petrosadid разработала пневматический смеситель (рисунок 1.15), в котором можно смешивать большие объемы смеси [134]. Такой смеситель сможет смешивать различные по плотности сухие мелкодисперсные материалы, простота очистки камеры смешивания делает его применимым в различных отраслях промышленности. Обладающий шестью или двенадцатью соплами, установленными внизу камеры смешивания по кругу, струи сжатого воздуха впрыскиваются в центр смеси. Смешивание происходит за счет потока, направленного вверх, который поднимает частицы материала и перемешивает. Автоматизированная система смешивания позволяет регулировать технологические параметры, которые влияют на процесс смешивания.

Технические характеристики: загрузка до 50 кг; расход воздуха 0,03 м³/с; давление энергоносителя 0,3 МПа; время смешивания 30 мин.

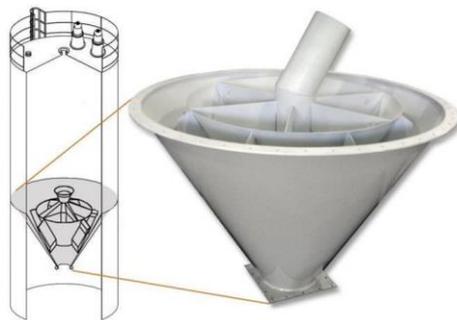


Рисунок 1.15 Пневматический смеситель Petrosadid

Смешивание в смесителе BLENDCON от компании Dynamic Air (рисунок 1.16) происходит за счет раскрытия струи сжатого воздуха, что влияет на кинетическую энергию частички, заставляя ее хаотично перемещаться по камере смешивания [67], и за счет пульсации энергоносителя воздуха (0,103-0,206 МПа), который движется по восходящей спирали.



Рисунок 1.16 Пневматический смеситель BLENDCON

Преимуществом такого смесителя является автоматизированная подача импульсивного впрыска сжатого воздуха и регулировка давления для смешивания хрупких и абразивных компонентов. Смесительная камера спроектирована так, что ее стенки облегчают очистку от остатков смеси, упрощая технологические требования. Технические характеристики: загрузка до 100 кг; расход воздуха 0,11 м³/с; давление энергоносителя 0,6 МПа; время смешивания 65 мин.

1.4 Существующие методики расчета пневматических смесителей

От качества готовой многокомпонентной смеси зависят не только характеристики (механические, физические и химические свойства), но и внешний вид готового изделия.

Качество смеси зависит от равномерного распределения компонентов по всему объему. Для контроля распределения компонентов используется метод определения коэффициента неоднородности по ключевому компоненту, предложенный А.М. Ластовцевым [57]:

$$V_c = \frac{100}{C_0} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2}{n_{\text{проб}} - 1}}, \quad (1.1)$$

где C_0 – концентрация по массе компонента, %; C_i – концентрация по массе одного из компонентов в пробах, %; $n_{\text{проб}}$ – число взятых проб, шт.

На данный момент существует некоторое количество методик для расчета пневматического смешивания [14, 16-23, 31-32, 81], например, работы М.Д. Барского, А.Ю. Вараксина, М.П. Калинушкина, В.Ф. Крамского, И.П. Малевича, А.А. Надеина, В.С. Серякова, М.М. Шапунова и др.

По мнению авторов Ю.А. Бирюкова и Л.Н. Богданова, производительность пневматического смесителя можно найти как:

$$Q_{\text{см}} = \mu \cdot q, \quad (1.2)$$

где q – расход воздуха, м³/с; μ – расходная концентрация, кг/кг. Расходная концентрация сыпучего материала в пневматическом смесителе зависит от целого

ряда параметров и может быть представлена в виде следующей функциональной зависимости:

$$\mu = f(p_{\text{раб}}, p_{\text{к}}, p_{\text{с}}, d_{\text{с}}, d_{\text{к}}, l_{\text{с}}, l_{\text{т}}, \rho_{\text{в}}, d_{\text{э}}, v_{\text{в}}), \quad (1.3)$$

где $p_{\text{раб}}$ - давление воздуха на входе в смеситель, Па; $p_{\text{к}}$ - давление в смесителе, Па; $p_{\text{с}}$ - противодействие насыпного слоя, Па; $d_{\text{с}}$ - диаметр сопла, м; $d_{\text{к}}$ - диаметр камеры смешивания, м; $l_{\text{с}}$ - расстояние между выходными отверстиями в пневматическом смесителе, м; $l_{\text{т}}$ - длина спиральной трубки, м; $d_{\text{э}}$ - эквивалентный диаметр частиц, м; $v_{\text{в}}$ - скорость воздушного потока, м/с; $\rho_{\text{в}}$ - плотность воздушного потока.

По мнению авторов А.Т. Росляк, Ю.А. Бирюкова, В.Н. Пачина, для устойчивого пневмосмешивания материала со скоростью витания ($v_{\text{вит}}$, м/с), скорость воздушного потока должна измениться в пределах $v_{\text{в}} \approx 1,5 \div 2v_{\text{вит}}$ [7]. Следует отметить, что увеличение скорости воздушного потока более чем в 2 раза, приводит к нерациональным потерям энергии.

Потери давления потока в рабочем сопле определяются при условии не сжимаемости воздушного потока из формулы:

$$\Delta p_{\text{с}} = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot v_{\text{в}}^2}{2} \cdot \frac{1}{1} \left(1 - \frac{S_{\text{с}}}{S_{\text{к}}}\right), \quad (1.4)$$

где $S_{\text{с}}$ - площадь сечения сопла, м²; $S_{\text{к}}$ - площадь сечения камеры смесителя, м².

Рабочее давление в подводящей магистрали определяется соотношением, Па [11]:

$$p_{\text{р}} = p_{\text{с}} + \Delta p_{\text{тр}}, \quad (1.5)$$

где $p_{\text{с}}$ - давление в сопле, Па; $\Delta p_{\text{тр}}$ - потеря давления на трение при движении воздуха, Па.

При заданном диаметре и высоте камеры, а также расходе воздуха, потеря давления, Па, находится из соотношения [7, 11]:

$$\Delta p_{\text{пот}} = \frac{Q_{\text{см}}}{\rho_{\text{м}} \cdot v_{\text{в}} \cdot S_{\text{к}}} (c_{\text{м}} - c_{\text{в}}) L_{\text{т}} S_{\text{с}} + \frac{Q_{\text{м}}(v_{\text{в}} - v_{\text{с}})}{S_{\text{к}}}, \quad (1.6)$$

где ρ_m – плотность материала кг/м³; c_m – концентрация материала, %; c_b – концентрация воздуха, %; L_T – длина камеры смесителя, м; v_c – скорость воздуха в сопле, м/с; Q_m – объемный расход материала, м³/с.

Среднее время пребывания частиц ключевого компонента в смесителе за полный цикл определяется по формуле [7, 11]:

$$t_{cp} = \frac{v}{Q_m}. \quad (1.7)$$

где v – объем смешиваемого материала, м³.

При постоянном расходе воздуха q зависимость расходной концентрации от параметра $l_c/d_{тр}$ (рисунок 1.17) близка к линейной.

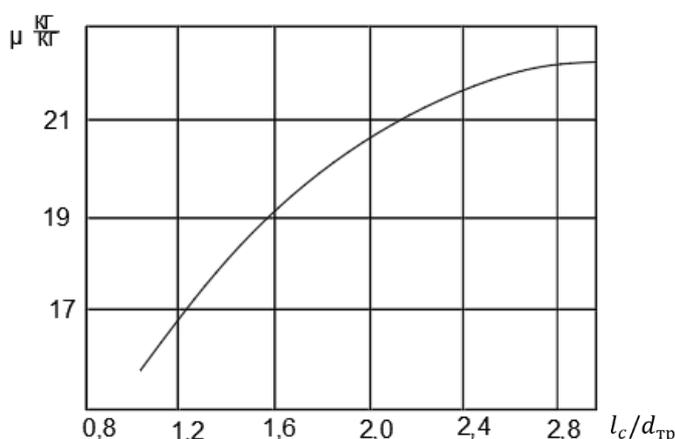


Рисунок 1.17 Зависимость расходной концентрации от параметра $l_c/d_{тр}$

Тогда, принимая за сечение приемной камеры $S_6 = \pi \cdot d_k \cdot l_c$, массовый расход материала $Q_{м.р.}$, кг/ч через S_6 определяется как [7]:

$$Q_{м.р.} = \rho_n \cdot v_m \cdot S_6, \quad (1.8)$$

где ρ_n – средняя насыпная плотность материала, кг/м³; v_m – скорость материала на входе в пневматический смеситель, м/с.

Расходная концентрация материала равна [73]:

$$\mu = \frac{Q_{м.р.}}{q}, \quad (1.9)$$

где

$$q = \frac{1}{4} \pi \cdot \rho_b \cdot v_b \cdot d_k^2 = const. \quad (1.10)$$

Анализ существующих методик расчета пневматических смесителей показал, что отсутствуют единые рекомендации для определения технологических

параметров смесителя, поэтому требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований, которые будут направлены на разработку методик расчета пневмосмесителей.

1.5 Предлагаемая конструкция пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой

После проведенного анализа конструкций смесителей, направлений их развития и требований, необходимых при производстве ССС, была разработана новая конструкция пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой. Данная разработка может использоваться не только для промышленности строительных материалов, но и в химической, лакокрасочной, пищевой и других отраслях промышленности.

Такая конструкция позволяет создать хаотично-вихревое движение энергоносителя с материалом за счет тангенциально-составляющих скоростей потока, что обеспечивает интенсивное смешивание материалов и ведет к увеличению степени однородности и, соответственно, к повышению качества готового продукта. Конструкция пневматического смесителя защищена патентом РФ на полезную модель «Пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов» [77-79]. Сущность пневматического смесителя для мелкодисперсных сыпучих материалов поясняется рисунком 1.18.

Его работа основана на перемещении компонентов материала в вихревом потоке сжатого воздуха. Материал поступает в корпус 1 через патрубок 6. В корпусе 1 материал встречается со сжатым воздухом, выходящим из отверстий в спиральной энергонесущей трубке 4, закрепленной при помощи держателей 5. Отверстия на спиральной энергонесущей трубке 4 расположены равномерно, в шахматном порядке, а оси отверстий направлены вниз под углом 30° - 35° относительно вертикальной плоскости. За счет вытягивания спиральной энергонесущей трубки 4 конусом вниз увеличивается площадь взаимодействия сжатого воздуха с компонентами перемешивания в корпусе 1. В нижней части

смесителя в виде конуса 2 создается разрежение и смесь переходит через патрубок 3 в осадительное устройство (на рисунке не показано). Техническое решение направлено на снижение коэффициента неоднородности готовой смеси за счет интенсивного воздействия сжатого воздуха на компоненты смешивания.

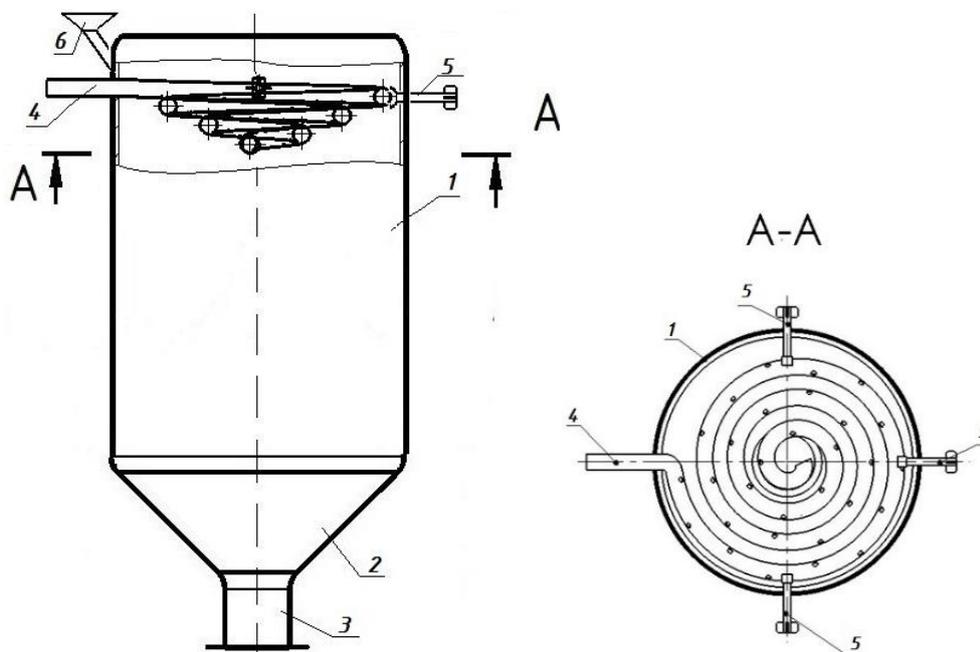


Рисунок 1.18 Схема пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой:
 1 – корпус; 2 – конус; 3 – патрубок; 4 – спиральная энергонесущая трубка;
 5 – держатели; 6 – патрубок

Разработка и проектирование пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой производилась с использованием систем автоматизированного проектирования программного продукта от компании Dassault Systemes CAD/CAE системы SolidWorks [13, 52, 82]. В этой программе разрабатывались первоначальные эскизы и на их основании создавалась электронно-цифровая модель и сборная конструкция. Опыт показывает, что для грамотной разработки и проектирования новых конструкций целесообразно использовать САПР, это позволяет упростить процесс разработки и проектирования различных конструкций за счет разнообразия различных инструментов, а также анализа зазоров и интерференции геометрии.

1.6 Цель и задачи исследований

Цель работы: совершенствование пневматического смесителя, обеспечивающего получение качественных вермикулит содержащих смесей с использованием спиральной энергонесущей трубки.

В соответствии с целью решались следующие задачи:

1. Провести анализ отечественного и зарубежного смесительного оборудования и направлений совершенствования пневматических смесителей.

2. Разработать патентно-чистую конструкцию пневматического смесителя для получения смесей с различными физико-механическими свойствами.

3. Получить аналитические выражения, определяющие компоненты вектора скорости воздушного потока в камере смесителя в зависимости от геометрии цилиндрической камеры пневматического смесителя.

4. Получить аналитическое выражение, описывающее изменение концентрации выделенного компонента смеси сыпучего материала в цилиндрическом объеме камеры смешивания.

5. Разработать методику проведения экспериментальных исследований на пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой, с использованием многофакторного планирования экспериментов установить закономерности изменения производительности, коэффициента неоднородности и предела прочности экспериментальных образцов.

6. Разработать инженерную методику расчета конструктивно-технологических параметров и рациональные режимы работы пневматического смесителя.

7. Разработать рекомендации для промышленного использования результатов исследования новой конструкции пневматического смесителя.

1.7 Выводы

1. Изучено состояние и уровень развития техники и технологии получения сухих теплоизоляционных материалов. Определены проблемные задачи смешивания компонентов, составляющих смесь, с учетом их физико-механических свойств. Установлено, что для смешивания компонентов с различными плотностями, в частности, в смесях с вермикулитом, целесообразно применять пневматические смесители.

2. Выявлено, что одним из способов усовершенствования пневматических смесителей является интенсификация процесса смешивания в рабочей камере.

3. Существующие методики расчета не могут полноценно описать процесс пневматического смешивания.

4. Для повышения эффективности смешивания предложена патентно-чистая конструкция пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой, позволяющая получать сухие строительные смеси требуемого стандартами качества.

5. Сформулированы цели и задачи исследования.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СУХИХ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ СМЕСИТЕЛЕ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ

2.1 Основные предпосылки и положения

Рассмотрим процесс движения пылевоздушного потока в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой. В пневматический смеситель компоненты смеси подаются дозаторами. Описание аэродинамического 3-х мерного потока, от которого зависит процесс смешивания, является сложной задачей и зависит от многих параметров (входных параметров) которые можно регулировать, например, скорость истечения энергонесителя, диаметр входного отверстия [2, 10, 11, 15, 17, 87]. Для математического описания процесса, происходящего в камере пневматического смесителя, сделаем ряд допущений:

1. Для интерпретации результатов работы [146] приведем скорость мелкодисперсной частицы, лобовое сопротивление которой рассчитывается по формуле Клячко. Согласно графику, приведенному в работе [146] и на рисунке 2.1, скорость мелкодисперсной частицы асимптотически приближается к скорости воздушного потока в течении 0,1 с.

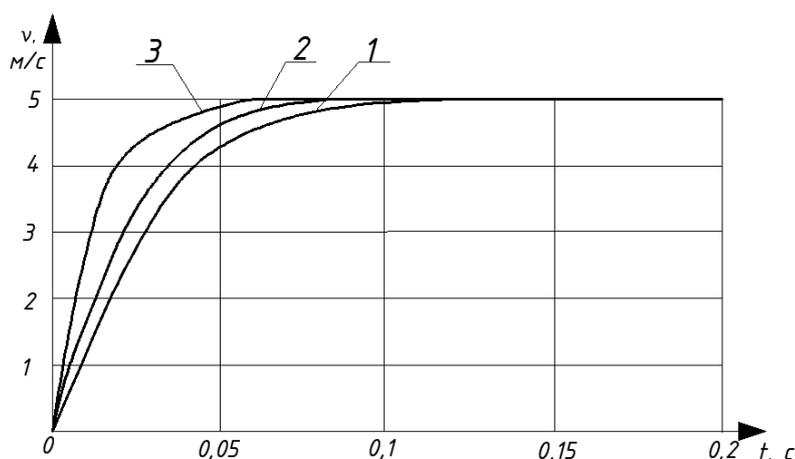


Рисунок 2.1 Измерение скорости движения частицы по времени:
1 – частица 100 мкм; 2 - частица 80 мкм; 3 - частица 60 мкм

Согласно сказанному, при дальнейшем рассмотрении движения частицы предполагаем, что в нашем случае скорость движения частицы и материала

отличается от скорости движения воздушного потока на бесконечно малую величину, которой в дальнейшем можно пренебречь.

2. Пренебрегаем взаимодействием частиц друг с другом при их движении.

2.2 Математическое описание движения воздушной среды в цилиндрической камере пневматического смесителя

Рассмотрим движение воздушной среды в цилиндрической камере пневматического смесителя (рисунок 2.2). Обозначим через Q_0 объём воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$, который поступает в спиральную энергонесущую трубку с диаметром d_0 , м, в единицу времени.

$$Q_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} v_0, \quad (2.1)$$

где v_0 - скорость поступления воздуха в спиральную энергонесущую трубку, $\text{м}/\text{с}$.

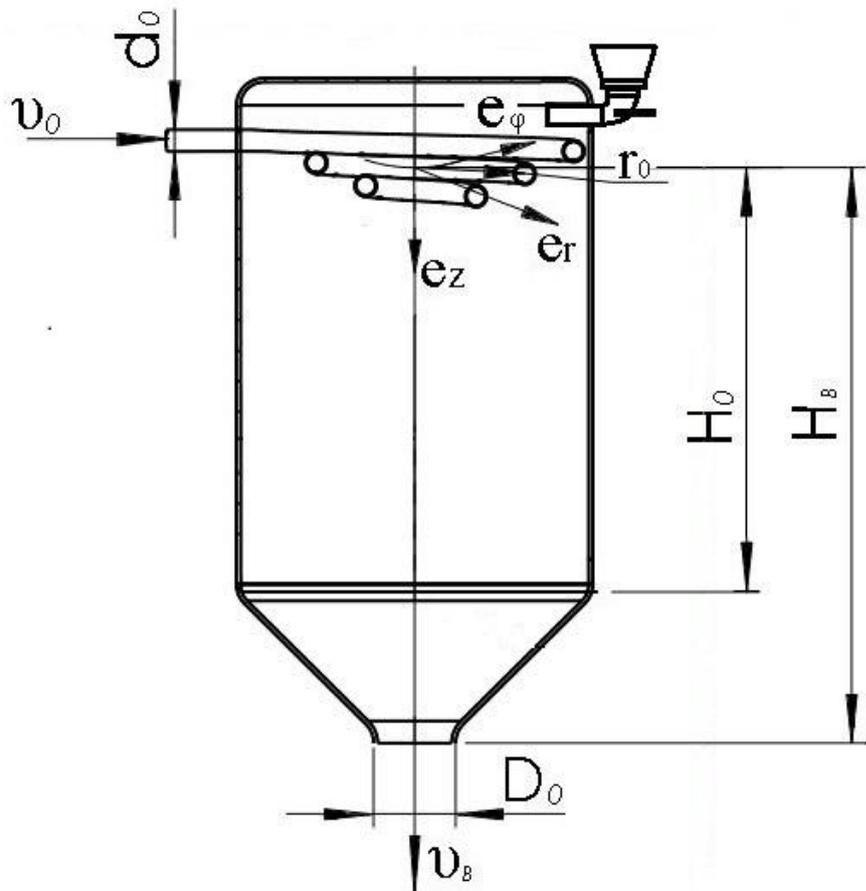


Рисунок 2.2 Расчетная схема для определения поля скоростей в цилиндрической камере

Пусть Q_1 – объемный расход воздуха, м³/с, истекающий из спиральной энергонесущей трубки, величина которого определяется соотношением:

$$Q_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot v_1 \cdot n, \quad (2.2)$$

здесь n – число отверстий в спиральной энергонесущей трубке, шт, с диаметром d_1 , м; v_1 – скорость истечения воздуха из каждого отверстия, м/с, значение которого определяется следующим соотношением [24]:

$$v_1 = 0,668 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{\rho}}, \quad (2.3)$$

где p_1 – давление в спиральной энергонесущей трубке, Па; p_0 – давление в цилиндрической камере, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³; 0,668 – коэффициент скорости.

На основании равенства соотношений (2.1) и (2.2) имеем:

$$\frac{\pi d_0^2}{4} v_0 = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot v_1 \cdot n. \quad (2.4)$$

Из соотношения (2.4) можно найти необходимое число отверстий в спиральной энергонесущей трубке, шт:

$$n = \frac{d_0}{d_1} \cdot \frac{v_0}{v_1}. \quad (2.5)$$

Подстановка (2.3) в (2.5) приводит к следующему результату:

$$n = v_0 \cdot \frac{d_0}{d_1} \cdot 1,497 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2(p_1 - p_0)}}. \quad (2.6)$$

Если через Q_B обозначить объемный расход воздуха, м³/с, покидающий камеру смесителя:

$$Q_B = \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot v_B, \quad (2.7)$$

где v_B – скорость воздуха, м/с, тогда на основании соотношений (2.1), (2.7) имеем:

$$\frac{\pi d_0^2}{4} v_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot v_B. \quad (2.8)$$

где D_0 – диаметр выходного патрубка, м.

Согласно (2.8) находим:

$$v_B = v_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2. \quad (2.9)$$

Используя уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{\vartheta}) = 0, \quad (2.10)$$

определим поле скоростей воздушного потока в цилиндрической камере. В силу того факта, что плотность воздушной смеси внутри камеры является постоянной величиной, поэтому уравнение (2.10) можно привести к виду:

$$\operatorname{div} \vec{\vartheta} = 0. \quad (2.11)$$

Решение уравнения (2.11) ищем в виде:

$$\vec{\vartheta} = -\operatorname{grad} \psi. \quad (2.12)$$

Здесь скалярная функция ψ представляет собой потенциал скорости.

Подстановка (2.12) в (2.11) приводит к следующему уравнению:

$$\Delta \psi = 0. \quad (2.13)$$

Здесь Δ - оператор Лапласа.

Для нахождения решения уравнения (2.13) в центре спиральной трубки цилиндрической камеры смесителя введем цилиндрическую систему координат r, φ, z с единичными ортами e_r, e_φ, e_z (рисунок 2.1).

В цилиндрической системе координат оператор Лапласа имеет вид [40]:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (2.14)$$

В силу аксиальной симметрии будем предполагать, что потенциал скоростей $\psi(r, z)$ зависит только от двух координат. С учетом (2.14) уравнение (2.13) принимает вид:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0. \quad (2.15)$$

Решение дифференциального уравнения (2.15) ищем в рамках метода Фурье [40]. Согласно этому методу, решение необходимо представить в виде:

$$\psi(r, z) = \psi_1(r) \cdot \psi_2(z). \quad (2.16)$$

Применение (2.16) к (2.15) приводит к следующему результату:

$$\psi_2(z) \cdot \left[\frac{d^2 \psi_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_1}{dr} \right] + \psi_1(r) \frac{d^2 \psi_2}{dz^2} = 0. \quad (2.17)$$

Приведем (2.17) к виду:

$$\frac{1}{\psi_1(r)} \left[\frac{d^2 \psi_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_1}{dr} \right] = - \frac{1}{\psi_2(z)} \frac{d^2 \psi_2}{dz^2}. \quad (2.18)$$

Анализ выражения (2.18) позволяет сделать вывод, что равенство (2.18) выполняется только в том случае, если левая и правая части в свою очередь являются постоянной величиной равной λ_1^2 которую предстоит в дальнейшем найти. Поэтому на основании (2.18) можно получить следующие два уравнения.

$$\frac{d^2\psi_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_1}{dr} = \lambda_1^2 \psi_1(r), \quad (2.19)$$

$$\frac{d^2\psi_2}{dz^2} + \lambda_1^2 \psi_2(z) = 0. \quad (2.20)$$

Решение уравнения (2.20) имеет вид:

$$\psi_2(z) = c_1 \cos \lambda_1 z + c_2 \sin \lambda_1 z, \quad (2.21)$$

где c_1 и c_2 произвольные постоянные.

В уравнении (2.19) произведём замену переменной согласно соотношению:

$$\xi = \lambda_1 \cdot r. \quad (2.22)$$

В результате замены (2.22) уравнение (2.19) примет вид:

$$\xi^2 \frac{d^2\psi_1}{d\xi^2} + \xi \frac{d\psi_1}{d\xi} - \xi^2 \psi_1 = 0. \quad (2.23)$$

В рамках информационной системы «Maple» находим базисное (фундаментальное) решение:

$$[I_0(\xi), K_0(\xi)]. \quad (2.24)$$

Здесь $I_0(\xi)$ и $K_0(\xi)$ представляют собой модифицированные функции Бесселя нулевого порядка [30, 132]. Графики функций $I_0(\xi)$ и $K_0(\xi)$ представлены соответственно на рисунке 2.3.

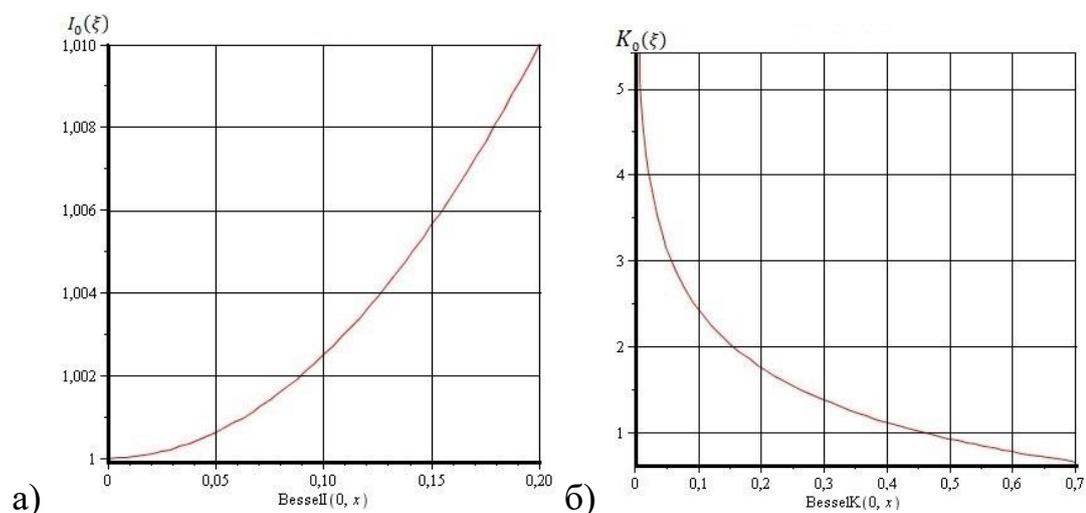


Рисунок 2.3 Графики функций:
 а – графики функций $I_0(\xi)$; б – график функций $K_0(\xi)$

Как следует из приведённого графика (рис. 2.3) функция Бесселя $I_0(\xi)$ является возрастающей, минимальное значение получаем при значениях по оси $x \approx 0$ и оси $y = 1$, максимальное значение на графике будет при оси $x = 0,2$ и оси $y = 1,01$. Функция $K_0(\xi)$ является убывающей, здесь максимальное значение получаем при значениях по оси $x \approx 0$ и оси $y = 5,5$, минимальное значение на графике будет при оси $x = 0,7$ и оси $y \approx 0$.

Основываясь на поведении функции (2.24), решение уравнения (2.23) можно записать следующим образом:

$$\psi_1(\xi) = c_3 I_0(\lambda_1 \cdot r), \text{ при } 0 \leq r \leq r_0, \quad (2.25)$$

$$\psi_1(\xi) = c_4 K_0(\lambda_1 \cdot r), \text{ при } r \geq r_0. \quad (2.26)$$

Здесь r_0 – средний радиальный размер спирали, м, подающей воздух в камеру смесителя, а c_3 и c_4 произвольные постоянные.

В силу непрерывности функции $\psi_1(\lambda_1 \cdot r)$ в точке $r = r_0$ имеем:

$$c_3 I_0(\lambda_1 \cdot r_0) = c_4 K_0(\lambda_1 \cdot r_0). \quad (2.27)$$

На основании (2.27) находим:

$$c_4 = c_3 \frac{I_0(\lambda_1 \cdot r_0)}{K_0(\lambda_1 \cdot r_0)}. \quad (2.28)$$

На основании (2.12) можно получить следующее соотношение:

$$\vec{\vartheta} = -\frac{\partial \psi}{\partial r} \vec{e}_r - \frac{\partial \psi}{\partial z} \vec{e}_z = \vartheta_r \vec{e}_r + \vartheta_z \vec{e}_z. \quad (2.29)$$

На основании (2.16), (2.21) и (2.29) имеем:

$$\vartheta_z = -\frac{\partial \psi}{\partial z} = -\psi_1(r) \cdot \frac{\partial \psi_2}{\partial z} = -\psi_1(r) (-c_1 \lambda \sin(\lambda z) + c_2 \lambda \cos(\lambda z)), \quad (2.30)$$

$$\vartheta_r = -\frac{\partial \psi}{\partial r} = -\frac{\partial \psi_1}{\partial r} \psi_2(z). \quad (2.31)$$

Подстановка (2.21), (2.25) и (2.26) в (2.31) позволяет записать следующие соотношения:

$$\vartheta_r = c_3 \lambda_1 \frac{dI_0(\xi)}{d\xi} (c_1 \cos(\lambda_1 z) + c_2 \sin(\lambda_1 z)); \quad 0 \leq r \leq r_0, \quad (2.32)$$

$$\vartheta_r = -c_4 \lambda_1 \frac{dK_0(\xi)}{d\xi} (c_1 \cos(\lambda_1 z) + c_2 \sin(\lambda_1 z)); \quad r \geq r_0. \quad (2.33)$$

Для нахождения постоянных величин в (2.30) необходимо воспользоваться следующим граничным условием:

$$\vartheta_z(r = r_0, z = 0) = 0. \quad (2.34)$$

Применение (2.34) к формуле (2.30) дает:

$$-\psi_1(r_0) \cdot c_2 \lambda_1 = 0. \quad (2.35)$$

Так как $\psi_1(r_0) \neq 0$, поэтому имеем $c_2 = 0$.

На основании полученных результатов можно записать:

$$\vartheta_z = \lambda_1 c_3 I_0(\lambda_1 r) \sin(\lambda_1 z), \quad 0 \leq r \leq r_0, \quad (2.36)$$

$$\vartheta_z = \lambda_1 c_4 K_0(\lambda_1 r) \sin(\lambda_1 z), \quad r \geq r_0. \quad (2.37)$$

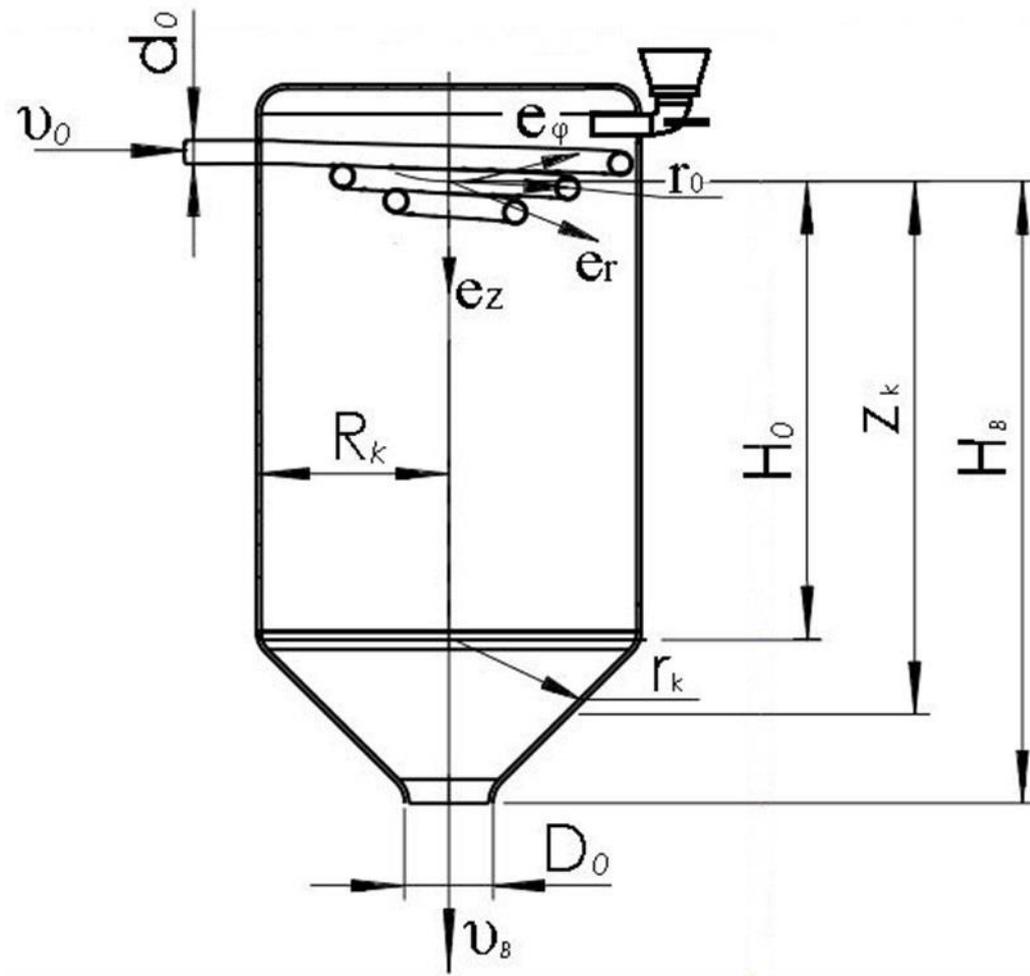


Рисунок 2.4 Расчетная схема для задания граничных условий

По расчетной схеме на рисунке 2.4 можно найти связь между величинами r_k и z_k на конической поверхности в интервале изменения $H_0 \leq z_k \leq H_B$; $\frac{D_0}{2} \leq r_k \leq R_k$:

$$z_k = \frac{r_k - R_k}{\frac{D_0}{2} - R_k} (H_B - H_0) + H_0, \quad (2.38)$$

и записать граничные условия:

$$\vartheta_z(r = 0, z = H_0) = \vartheta_B, \quad (2.39)$$

$$\vartheta_r \left(r = \frac{D_0}{2}, z = H_0 \right) = 0. \quad (2.40)$$

Здесь R_k – радиус камеры смешивания, м; H_B – высота от начала координат до конца камеры смешивания, м; H_0 – высота от начала координат до конца цилиндрической части камеры смешивания, м; z_k – высота от начала координат до среднего радиуса конической части камеры смешивания, м; r_k – средний радиус конической части камеры смешивания, м.

На основании полученных результатов формулы (2.32) и (2.33) представим в следующем виде:

$$\vartheta_r = c_3 \lambda_1 I_1(\lambda_1 r) \cos(\lambda_1 z), \quad 0 \leq r \leq r_0, \quad (2.41)$$

$$\vartheta_r = c_4 \lambda_1 K_1(\lambda_1 r) \cos(\lambda_1 z), \quad r \geq r_0. \quad (2.42)$$

Здесь учтено, что согласно справочным данным [40]:

$$I_1(\xi) = \frac{dI_0(\xi)}{d\xi}, \quad (2.43)$$

$$\frac{dK_0(\xi)}{d\xi} = -K_1(\xi), \quad (2.44)$$

где $I_1(\xi)$ и $K_1(\xi)$ – соответственно, модифицированные функции Бесселя первого порядка.

Применение (2.40) к выражению (2.42) позволяет получить следующий результат:

$$c_4 \lambda_1 K_1(\lambda_1 r_k) \cos(\lambda_1 H_0) = 0. \quad (2.45)$$

В силу того, что $c_4 \neq 0$, $K_1(\lambda r_k) \neq 0$ имеем:

$$\cos(\lambda_1 H_0) = 0. \quad (2.46)$$

Из формулы (2.46) находим:

$$\lambda_1 \cdot H_0 = \frac{\pi}{2}, \quad (2.47)$$

а из формулы (2.47) определяем:

$$\lambda_1 = \frac{\pi}{2H_0}. \quad (2.48)$$

Применение (2.39) к (2.36) позволяет получить следующий результат:

$$v_B = \lambda_1 c_3 \sin(\lambda_1 H_0). \quad (2.49)$$

На основании (2.49) с учетом (2.9) можно найти:

$$c_3 = \frac{v_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2}{\lambda_1 \sin(\lambda_1 H_0)}. \quad (2.50)$$

На основании полученных соотношений запишем следующие выражения, определяющие поле скоростей воздушного потока в цилиндрической камере смесителя (рисунки 2.5 - 2.8):

$$v_r = \begin{cases} \frac{v_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 I_1(\lambda_1 r) \cos(\lambda_1 z)}{I_0\left(\lambda_1 \frac{D_0}{2}\right) \cdot \sin(\lambda_1 H_0)}, & 0 \leq r \leq r_0, 0 \leq z \leq H_0, \\ \frac{v_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 I_0(\lambda_1 r_0) K_1(\lambda_1 r) \cos(\lambda_1 z)}{I_0\left(\lambda_1 \frac{D_0}{2}\right) \cdot \sin(\lambda_1 H_0) K_0(\lambda_1 r_0)}, & r \geq r_0, 0 \leq z \leq H_0. \end{cases} \quad (2.51)$$

$$v_z = \begin{cases} \frac{v_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 I_0(\lambda_1 r) \sin(\lambda_1 z)}{I_0\left(\lambda_1 \frac{D_0}{2}\right) \cdot \sin(\lambda_1 H_0)}, & 0 \leq r \leq r_0, 0 \leq z \leq H_0, \\ \frac{v_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 I_0(\lambda_1 r_0) K_0(\lambda_1 r) \sin(\lambda_1 z)}{I_0\left(\lambda_1 \frac{D_0}{2}\right) \cdot \sin(\lambda_1 H_0) K_0(\lambda_1 r_0)}, & r \geq r_0, 0 \leq z \leq H_0. \end{cases} \quad (2.52)$$

Зависимости построим для пневматического смесителя со следующими параметрами: радиус смесительной камеры $R_k = 0,25$ м, высота цилиндрической части корпуса от начала координат до конца цилиндра $H_0 = 1$ м, высота смесительной камеры от начала координат до конца выходного патрубка $H_B = 1,2$ м, количество отверстий на спиральной трубке изменялось в диапазоне $n = 10 - 55$ шт, диаметр входного отверстия на спиральной энергонесущей трубке в диапазоне $d_0 = 0,01 - 0,03$ м, диапазон среднего радиуса витков спирали равен $r_0 = 0,05 - 0,25$ м, диаметр выходного патрубка равен $D_0 = 0,05$ м.

Компонента скорости v_r воздушного потока (рисунок 2.5, а) в зависимости от изменения координат z и r в интервалах $0 \leq r \leq r_0, H_0 \leq z \leq H_B$ теряет скорость при увеличении значений координаты z . Скорость воздушного потока в точке координаты z ($H_0 = 1$ м) при координате r ($r_0 = 0,01$ м) будет $0,01$ м/с, а в точке координаты z ($H_0 = 1$ м) при координате r ($r_0 = 0,125$ м) будет $0,1$ м/с.

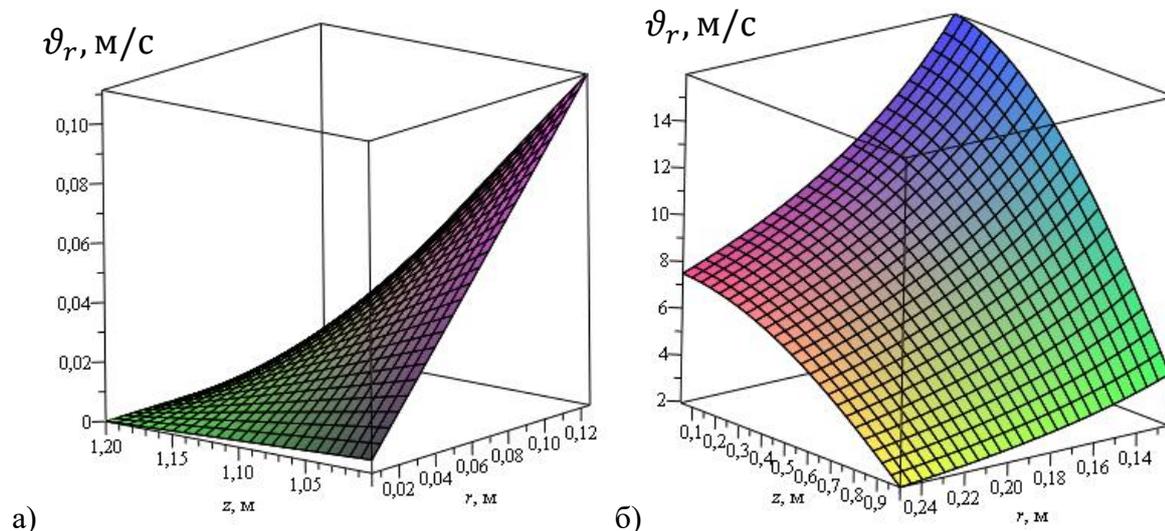


Рисунок 2.5 Изменение скорости воздушного потока v_r при изменении координат z и r :
 а – в интервалах $0 \leq r \leq r_0, H_0 \leq z \leq H_B$; б – в интервалах $r \geq r_0, 0 \leq z \leq H_0$;
 при $v_0 = 35$ м/с; $d_0 = 0,016$ м; $D_0 = 0,05$ м; $H_0 = 1$ м; $H_B = 1,2$ м $r_0 = 0,125$ м

Далее при увеличении значений координаты z в интервале от $H_0 = 1$ м до $H_B = 1,2$ м скорость воздушного потока теряет скорость и снижается до 0 м/с в точке $H_B = 1,2$ м.

Компонента скорости v_r (рисунок 2.5, б) в интервалах $r \geq r_0, 0 \leq z \leq H_0$ увеличивается при снижении значений по координатам z и r . Скорость воздушного потока при увеличении значений координаты z (H_0 от 0,1 до 1 м) в точке координаты r ($R_k = 0,25$ м) снижается в интервале от 7,5 м/с до 2 м/с, а в точке координаты r ($r_0 = 0,125$ м) скорость воздушного потока будет снижаться в интервале от 16 м/с до 4 м/с.

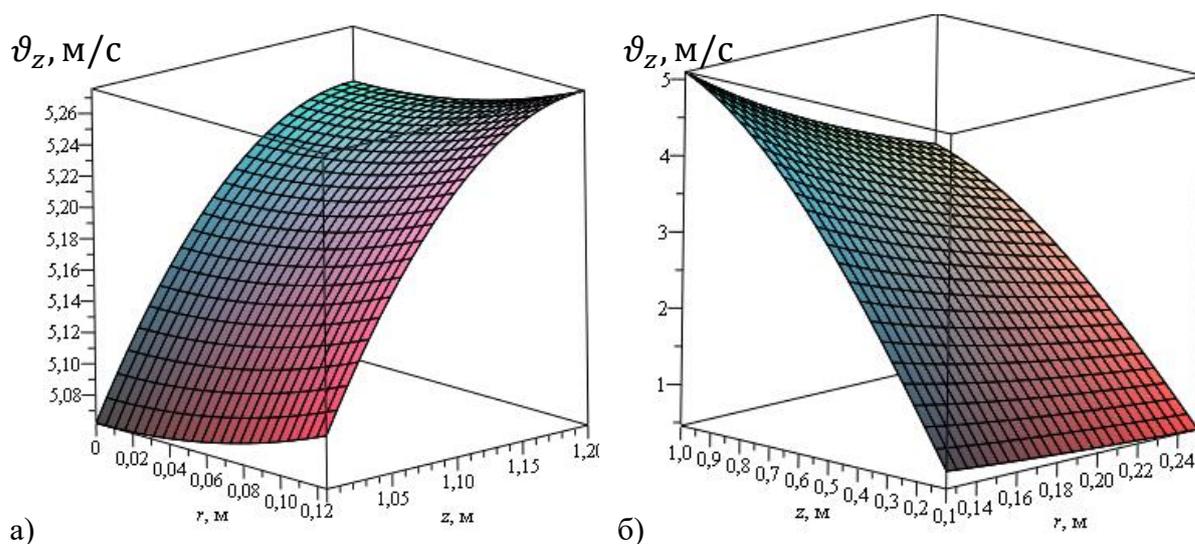


Рисунок 2.6. Изменение скорости воздушного потока v_z при изменении координат z и r :
 а – в интервалах $0 \leq r \leq r_0, H_0 \leq z \leq H_B$; б – в интервалах $r \geq r_0, 0 \leq z \leq H_0$;
 при $v_0 = 35$ м/с; $d_0 = 0,016$ м; $D_0 = 0,05$ м; $H_0 = 1$ м; $H_B = 1,2$ м

При изменении координаты r (от 0,125 до 2,5 м) скорость воздушного потока снижается от 4 до 2 м/с в точке координаты $z = 1$ м и от 16 м/с до 7,5 м/с в точке координаты $z = 0,1$ м.

Компонента скорости ϑ_z воздушного потока (рисунок 2.6, а) в интервалах $0 \leq r \leq r_0, H_0 \leq z \leq H_B$ возрастает при изменении координаты r (r_0 от 0,01 до 0,125 м) и координаты z от ($H_0 = 1$ м) до ($H_B = 1,2$ м). Максимальное значение скорости воздушного потока будет в точке с координатами r ($r_0 = 0,125$ м) и z ($H_B = 1,2$ м) и равно 5,28 м/с. Минимальное значение скорость потока будет при координатах r ($r_0 = 0$ м) и z ($H_0 = 1$ м) и равно 5 м/с.

Увеличение компоненты скорости ϑ_z (рисунок 2.6, б) в интервалах $r \geq r_0, 0 \leq z \leq H_0$ происходит при варьировании координат r (r_0 в интервале от 0,125 до 0,25 м) и z (H_0 от 0,1 до 1 м). Максимальное значение скорости воздушного потока будет в точке r ($r_0 = 0,125$ м) и z ($H_0 = 1$ м) и равно 5,1 м/с. Минимальное значение скорости потока будет при координате $r = 0,25$ м и z ($H_0 = 0,1$ м) и равно 0,5 м/с.

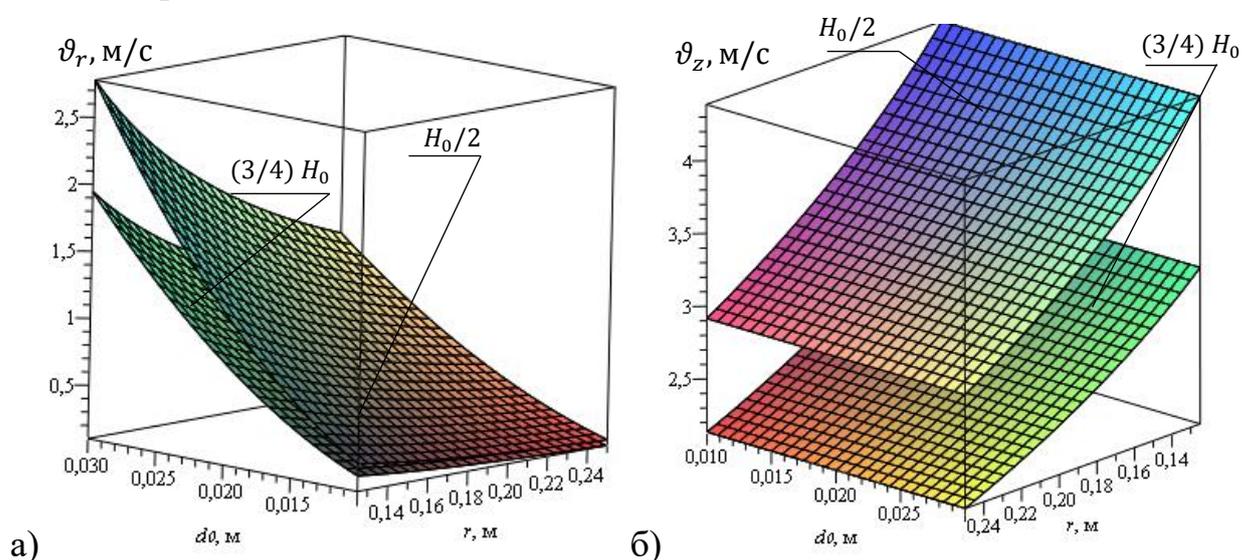


Рисунок 2.7 Изменение скорости воздушного потока при изменении координаты r и диаметра спиральной трубки d_0 на различной высоте цилиндрической камеры:

а – ϑ_r в интервале $r_0 \leq r \leq R_k$; б – ϑ_z в интервале $r_0 \leq r \leq R_k$;
при $\vartheta_0 = 35$ м/с; $D_0 = 0,05$ м; $H_0 = 1$ м; $H_B = 1,2$ м

Компонента скорости ϑ_r воздушного потока (рисунок 2.7, а) в зависимости от изменения координаты r в интервале $r_0 \leq r \leq R_k$ и диаметра спиральной трубки d_0 на различной высоте цилиндрической камеры H_0 имеет возрастающий характер. При уменьшении координаты r до 0,125 м скорость воздушного потока по вектору координаты r возрастает до 2,8 м/с при высоте камеры $\frac{1}{2} H_0$ и до 1,9 м/с при высоте $\frac{3}{4} H_0$. Наибольшие значения получаем при диаметре спиральной трубки $d_0 = 0,03$ м и наименьшие при $d_0 = 0,01$ м и равны 0,2 м/с при высоте камеры $\frac{1}{2} H_0$ и до 0,1 м/с при высоте $\frac{3}{4} H_0$.

Компонента скорости ϑ_z (рисунок 2.7, б) при варьировании диаметра спиральной трубки d_0 и координаты r возрастает до 3,3 м/с на высоте камеры $\frac{1}{2} H_0$. При высоте $\frac{3}{4} H_0$ скорость воздушного потока равна 4,5 м/с в точке координаты $r = 0,125$ м. Минимальное значение скорости будет в точке координаты $r = 0,25$ м и равняется 2,9 м/с при высоте камеры $\frac{1}{2} H_0$ и 2 м/с при высоте $\frac{3}{4} H_0$.

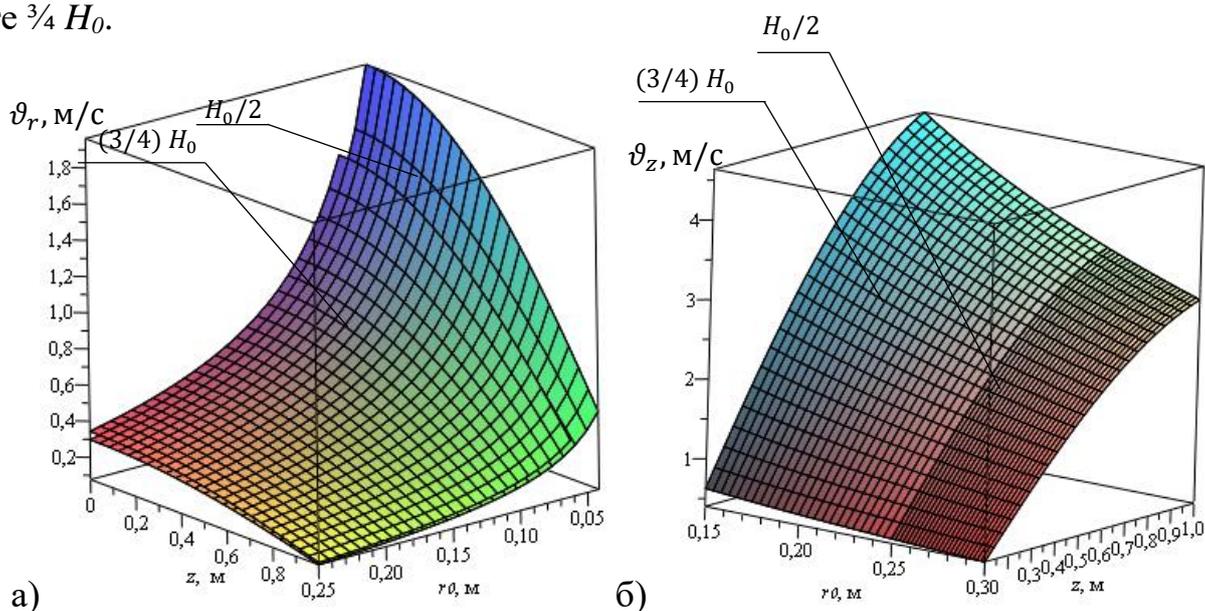


Рисунок 2.8 Изменение скорости воздушного потока при изменении координаты r и среднего радиуса витков спиральной трубки r_0 :
а – ϑ_r в интервале $0 \leq z \leq H_0$; б – ϑ_z в интервале $0 \leq z \leq H_0$;
при $\vartheta_0 = 35$ м/с; $d_0 = 0,016$ м; $D_0 = 0,05$ м; $H_0 = 1$ м; $H_B = 1,2$ м

Компонента скорости ϑ_r воздушного потока (рисунок 2.8, а) изменяется при координате z и среднего радиуса витков спиральной трубки r_0 в интервале $0 \leq z \leq H_0$ на различной высоте цилиндрической камеры H_0 . Скорость воздушного потока снижается при варьировании радиуса спиральной трубки от

0,05 до 0,25 м и высоты камеры смешивания от 0,1 до 1 м. При этих значениях скорость принимает максимальное значение и равняется 2 м/с при высоте камеры $\frac{1}{2} H_0$ и 1,6 м/с при высоте $\frac{3}{4} H_0$, в точке координаты $z = 0,1$ м и $r_0 = 0,05$ м. Минимальное значение получаем в точке координаты $z = 1$ м и $r_0 = 0,25$ м и равняется 0,15 м/с при высоте камеры $\frac{1}{2} H_0$ и 0,1 м/с при высоте $\frac{3}{4} H_0$. Максимальное значение компоненты скорости v_z (рисунок 2.8, б) доходит до 4,5 м/с при уменьшении среднего радиуса витков спирали и увеличении значений по координате z от 0 до 1 м на высоте камеры $\frac{1}{2} H_0$. Другие изменения высоты цилиндрической камеры практически не влияет на показания скоростей.

Таким образом, полученное выражение позволяет определить поле скоростей воздушного потока в цилиндрической камере смесителя со спиральной энергонесущей трубкой.

2.3 Описание процесса смешивания компонентов сыпучего материала в пневматическом смесителе

Описание процесса смешивания компонентов сыпучего материала в объеме рассматриваемой конструкции смесителя можно провести в рамках двухпараметрической диффузионной модели:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \overline{v_z} \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{D_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (2.53)$$

где D_z и D_r – соответственно, параметры продольного и радиального движения материала, м²/с; $\overline{v_z}$ – среднее значение скорости продольного движения материала, м/с; c – концентрация выделенной компоненты.

В данной модели принимается, что значения D_z , D_r , и среднее значение $\overline{v_z}$ являются постоянными по длине и поперечному сечению.

Рассматриваемая модель смесителя характеризуется наличием установившегося режима смешивания (не зависящим от времени). Поэтому можно предположить, что изменения концентрации (c) в этом случае будут

зависеть только от двух переменных $c(z, r)$. На основании этого факта уравнение (2.53) можно представить в виде:

$$D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \overline{\vartheta}_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{D_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) = 0. \quad (2.54)$$

Естественно предположить, что эти параметры продольного и радиального перемешивания прямо пропорциональны средним значениям скоростей движения в продольном и радиальном направлениях, а также геометрическим размерам камеры смешивания. На этом основании можно записать:

$$D_z = \overline{\vartheta}_z H_0, \quad (2.55)$$

$$D_r = \overline{\vartheta}_r R_k. \quad (2.56)$$

Далее будем предполагать, что средние значения скоростей движения частиц материала отличаются от среднего значения скоростей воздушного потока на бесконечно малую величину [146]. Поэтому на основании сказанного предположения можно записать следующие соотношения:

$$\overline{\vartheta}_r = \frac{1}{V} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{r_0}^{R_k} \int_0^{H_0} \vartheta_r \cdot r \cdot dr \cdot dz, \quad (2.57)$$

$$\overline{\vartheta}_z = \frac{1}{V} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{r_0}^{R_k} \int_0^{H_0} \vartheta_z \cdot r \cdot dr \cdot dz. \quad (2.58)$$

Здесь V – объем цилиндрического корпуса, м^3 , смесителя равный:

$$V = \pi(R_k^2 - r_0^2)H_0. \quad (2.59)$$

Подстановка (2.51) и (2.59) в (2.56) приводит к следующему результату:

$$\overline{\vartheta}_r = \frac{A_0}{R_k^2 H_0} \int_{r_0}^{R_k} K_1(\lambda_1 r) r dr \int_0^{H_0} \cos(\lambda_1 z) dz, \text{ при } r_0 \leq r, \quad (2.60)$$

где введено следующее обозначение:

$$A_0 = \frac{\vartheta_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 I_0(\lambda_1 r_0)}{\sin(\lambda_1 H_0) K_0(\lambda_1 r_0) \cdot I_0\left(\lambda_1 \frac{D_0}{2}\right)}. \quad (2.61)$$

Вычисление интегралов в (2.60) с учетом формулы (2.48) позволяет получить такой результат:

$$\overline{\vartheta}_r = \frac{16 \cdot A_0 \cdot Y_1 \cdot H_0^2}{\pi^2 R_k^2}, \quad (2.62)$$

где введены следующие обозначение:

$$Y_1 = \int_{\frac{\pi r_0}{2H_0}}^{\frac{\pi R_k}{2H_0}} K_1(x) \cdot x \cdot dx \quad (2.63)$$

Подстановка (2.52) в соотношение (2.58) позволяет записать следующие выражения:

$$\overline{\vartheta}_z = \frac{2A_0\pi}{V} \int_{r_0}^{R_k} K_0(\lambda_1 r) r dr \int_0^{H_0} \sin(\lambda_1 z) dz, \text{ при } r_0 \leq r. \quad (2.64)$$

Учитывая, что

$$\int_0^{H_0} \sin(\lambda_1 z) dz = \frac{1}{\lambda} \int_0^{H_0} \sin(\lambda_1 z) d(\lambda_1 z) = \frac{2H_0}{\pi}, \quad (2.65)$$

значение интеграла будет:

$$\int_{r_0}^{R_k} K_0(\lambda_1 r) r dr = \frac{1}{\lambda} [r_0 K_1(\lambda_1 r_0) - R_k K_1(\lambda_1 R_k)]. \quad (2.66)$$

Соотношение (2.64) с учетом (2.59), (2.66) можно привести к следующему виду для $r_0 \leq r$:

$$\overline{\vartheta}_z = \frac{8 \cdot H_0 \cdot A_0}{\pi^2 R_k^2} \left[r_0 K_1\left(\frac{\pi r_0}{2 \cdot H_0}\right) - R_k K_1\left(\frac{\pi R_k}{2 \cdot H_0}\right) \right]. \quad (2.67)$$

Уравнение (2.54) с учетом (2.55) и (2.56) примет вид:

$$\overline{\vartheta}_z H_0 \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \overline{\vartheta}_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\overline{\vartheta}_r R_k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) = 0. \quad (2.68)$$

В уравнении (2.68) перейдем к безразмерным переменным ξ_1 и ξ_2 согласно соотношениям:

$$z = \xi_1 H_0, \quad (2.69)$$

$$r = \xi_2 R_k. \quad (2.70)$$

В безразмерных переменных уравнение (2.68) можно представить в таком виде:

$$\gamma^2 \left[\frac{\partial^2 c}{\partial \xi_1^2} - \frac{\partial c}{\partial \xi_1} \right] + \frac{1}{\xi_2} \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left(\xi_2 \frac{\partial c}{\partial \xi_2} \right) = 0, \quad (2.71)$$

где введено следующее обозначение:

$$\gamma^2 = \frac{\overline{\vartheta}_z R_k}{\overline{\vartheta}_r H_0}. \quad (2.72)$$

С учетом (2.62) и (2.67) формула (2.72) принимает следующий вид:

$$\gamma^2 = \frac{[r_0 K_1\left(\frac{\pi r_0}{2 \cdot H_0}\right) - R_k K_1\left(\frac{\pi R_k}{2 \cdot H_0}\right)] R_k}{2 \cdot H_0^2 \cdot Y_1\left(\frac{R_k r_0}{H_0' H_0}\right)}. \quad (2.73)$$

Решение уравнения (2.71) ищем в виде:

$$c = c_1(\xi_1) \cdot c_2(\xi_2). \quad (2.74)$$

Подстановка (2.74) в (2.71) дает:

$$\gamma^2 c_2(\xi_2) \left[\frac{d^2 c_1}{d\xi_1^2} - \frac{dc_1}{d\xi_1} \right] + \frac{c_1(\xi_1)}{\xi_2} \frac{d}{d\xi_2} \left(\xi_2 \frac{dc_2}{d\xi_2} \right) = 0. \quad (2.75)$$

На основании (2.74) можно получить следующее соотношение:

$$\frac{\gamma^2}{c_1(\xi)} \left[\frac{d^2 c_1}{d\xi_1^2} - \frac{dc_1}{d\xi_1} \right] = - \frac{1}{c_2(\xi_2)\xi_2} \frac{d}{d\xi_2} \left(\xi_2 \frac{dc_2}{d\xi_2} \right). \quad (2.76)$$

Левая часть соотношения (2.76) зависит только от переменных ξ_1 , а правая - от ξ_2 , поэтому выполнение равенства в (2.76) возможно только в том случае, если каждая из частей является постоянной величиной равной $\beta^2 > 0$.

Согласно сказанному, соотношение (2.76) будет эквивалентно следующим двум дифференциальным уравнениям:

$$\gamma^2 \left[\frac{d^2 c_1}{d\xi_1^2} - \frac{dc_1}{d\xi_1} \right] = \beta^2 c_1, \quad (2.77)$$

$$\frac{d^2 c_2}{d\xi_2^2} + \frac{1}{\xi_2} \frac{dc_2}{d\xi_2} + \beta^2 c_2 = 0. \quad (2.78)$$

Решение уравнения (2.78), ограниченное при $\xi_2 \rightarrow 0$, можно представить в виде:

$$c_2 = A_1 J_0(\beta \xi_2) = A_1 J_0 \left(\beta \frac{r}{R_k} \right), 0 \leq r \leq r_0, \quad (2.79)$$

$$c_2 = A_2 Y_0(\beta \xi_2) = A_2 Y_0 \left(\beta \frac{r}{R_k} \right), r \geq r_0, \quad (2.80)$$

где J_0 и Y_0 – является функциями Бесселя первого рода нулевого порядка.

Решение (2.80) должно удовлетворить граничному условию:

$$\text{при } r = R_k, c_2(R_k) = 0. \quad (2.81)$$

Применение (2.81) к (2.80) позволяет получить:

$$A_2 Y_0(\beta) = 0. \quad (2.82)$$

На основании данной зависимости обращение (2.82) в первый ноль происходит при значении $\beta = \beta_1 = 0,8936 \dots$

На основании полученных данных решения (2.80), удовлетворяющее (2.81) можно записать в следующем виде:

$$c_2(r) = A_2 Y_0 \left(\beta_1 \frac{r}{R_k} \right), r \geq r_0. \quad (2.83)$$

При $r \geq r_0$ на основании (2.79) и (2.80) имеем:

$$A_1 J_0 \left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k} \right) = A_2 Y_0 \left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k} \right), \quad (2.84)$$

отсюда:

$$A_2 = \frac{A_1 J_0\left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k}\right)}{Y_0\left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k}\right)}. \quad (2.85)$$

при $r \geq r_0$

$$c_2(r) = \frac{A_1 J_0\left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k}\right)}{Y_0\left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k}\right)} Y_0\left(\beta_1 \frac{r}{R_k}\right). \quad (2.86)$$

Уравнение (2.77) представим в виде:

$$\frac{d^2 c_1}{d\xi_1^2} - \frac{dc_1}{d\xi_1} - \frac{\beta_1^2}{\gamma^2} c_1 = 0. \quad (2.87)$$

Для нахождения решения дифференциального уравнения (2.84) необходимо записать характеристическое уравнение:

$$k^2 - k - \left(\frac{\beta_1}{\gamma}\right) = 0. \quad (2.88)$$

Квадратное уравнение (2.85) имеет два корня:

$$k_1 = \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{\beta_1}{\gamma}\right)^2} < 0, \quad (2.89)$$

$$k_2 = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{\beta_1}{\gamma}\right)^2} > 0. \quad (2.90)$$

Выражение (2.90) не подходит, так как функция $c_1(z)$ убывающая.

Согласно (2.86) и (2.87) решение уравнения (2.84) можно представить в виде:

$$c_1(\xi_1) = A_1 \cdot e^{k_1 \xi_1}. \quad (2.91)$$

Переходя к размерным переменным согласно (2.69), имеем:

$$c_1(z) = A_1 \cdot e^{k_1 \frac{z}{H_0}}. \quad (2.92)$$

Подстановка (2.92) и (2.86) в формулу (2.74) приводит к следующему результату:

$$c(r, z) = \frac{A_1 J_0\left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k}\right)}{Y_0\left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k}\right)} Y_0\left(\beta_1 \frac{r}{R_k}\right) e^{k_1 \frac{z}{H_0}}, r \geq r_0. \quad (2.93)$$

$$c(r, z) = A_1 J_0\left(\beta_1 \frac{r}{R_k}\right) e^{k_1 \frac{z}{H_0}}, 0 \leq r \leq r_0 \quad (2.93, a)$$

Для определения значения постоянной в (2.93, а) необходимо воспользоваться следующими граничными условиями:

$$c(r = r_0, z = 0) = c_0; \quad (2.94)$$

где c_0 – начальное значение концентрации сухой смеси сыпучего материала.

Применение (2.94) к (2.93) дает:

$$c_0 = A_1 J_0 \left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k} \right), \quad (2.95)$$

$$A_1 = \frac{c_0}{J_0 \left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k} \right)}. \quad (2.96)$$

С учетом (2.96), (2.93) примет вид при $r \geq r_0$:

$$c(r, z) = \frac{c_0 Y_0 \left(\beta_1 \frac{r}{R_k} \right)}{Y_0 \left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k} \right)} e^{k_1 \frac{z}{H_0}}. \quad (2.97)$$

При достижении конечных размеров цилиндрической камеры смешения концентрация выделенной компоненты смеси должна принимать свое конечное значение « c_k ». На основании сказанного выражению (2.97) не обходимо придать следующий вид:

$$c(r, z) = c_k - (c_k - c_0) \cdot \frac{Y_0 \left(\beta_1 \frac{r}{R_k} \right)}{Y_0 \left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k} \right)} e^{k_1 \frac{z}{H_0}}. \quad (2.98)$$

Таким образом, полученное соотношение (2.98) описывает процесс изменения концентрации выделенной компоненты смеси в объеме цилиндрической камеры смесителя со спиральной энергонесущей трубкой.

Зависимость построим для пневматического смесителя со следующими параметрами: радиус смесительной камеры $R_k = 0,25$ м, высота смесительной камеры от начала координат до конца выходного патрубка $H_b = 1,2$ м, количество отверстий на спиральной трубке $n = 35$ шт, диаметр входного отверстия на спиральной энергонесущей трубке $d_0 = 0,016$ м, конечное значение концентрации $c_k = 0,5$, начальное значение концентрации $c_0 = 0,85$.

Рассмотрим изменение концентрации выделенной компоненты c (рисунок 2.9) в интервале $r \geq r_0$ и варьировании высоты цилиндрической камеры (H_0) и координаты r . Снижение значений концентрации происходит с увеличением

значений H_0 и координаты r , где самая высокая концентрация будет возле спиральной трубки в центре смесительной камеры и равняться 0,85.

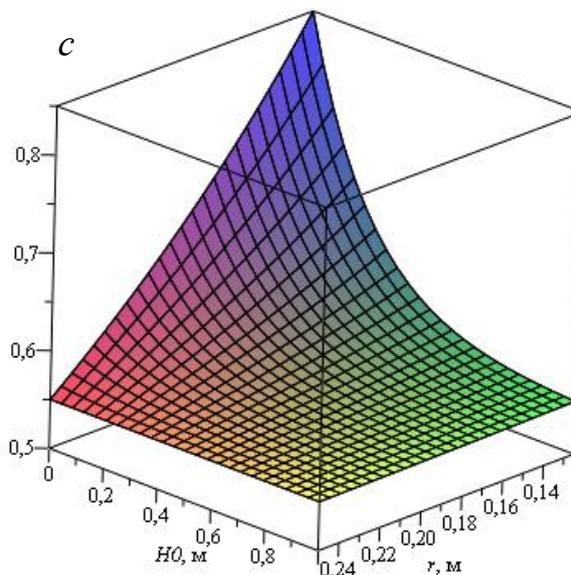


Рисунок 2.9 График изменения концентрации выделенной компоненты: при $\vartheta_0 = 35$ м/с; $d_0 = 0,016$ м; $D_0 = 0,05$ м; $H_B = 1,2$ м; $H_0 = 1$ м; $r_0 = 0,125$ м; $c_0 = 0,85$; $c_k = 0,5$

Чем дальше компонента смеси продвигается по высоте цилиндрической камере и от центра к стенкам камеры, тем больше она стремится к рациональным значениям, в нашем случае, это 0,55.

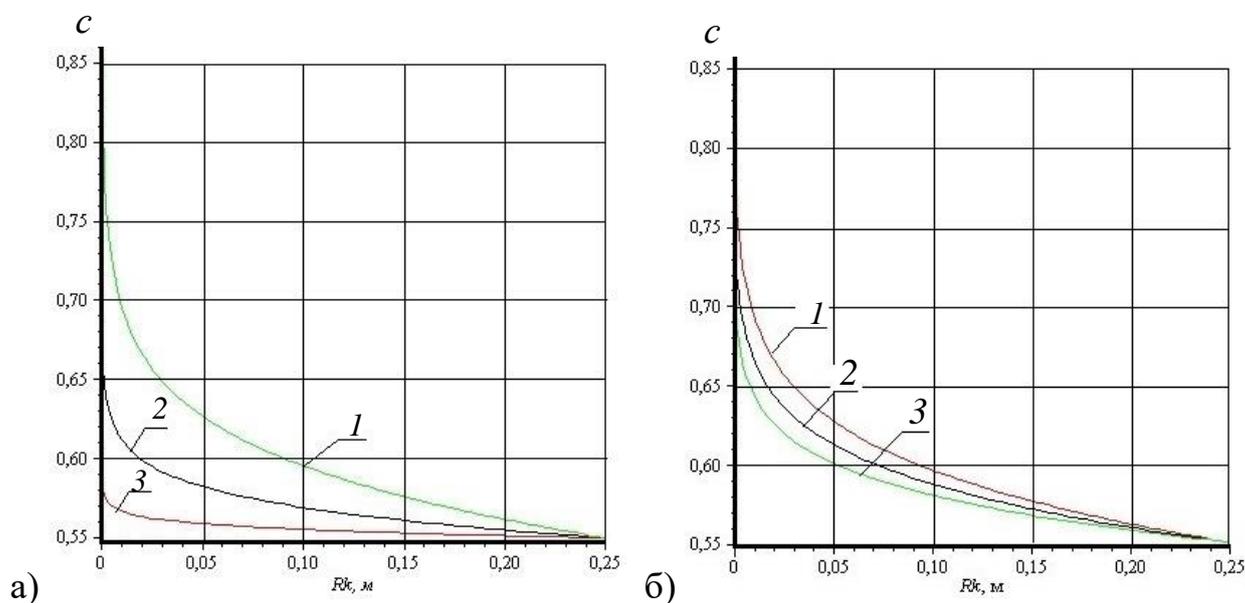


Рисунок 2.10 Изменения концентрации выделенной компоненты при $0 \leq R_k \leq 0,25$:

- а) 1 – $H_0 = 0,6$ м; 2 – $H_0 = 0,8$ м; 3 – $H_0 = 1$ м.
 б) 1 – $r_0 = 0,075$ м; 2 – $r_0 = 0,1$ м; 3 – $r_0 = 0,125$ м

При увеличении высоты цилиндрической части корпуса смесителя H_0 от 0,6 до 1 м (рисунок 2.10, а) значение концентрации выделенной компоненты

снижается до минимального значения, равного 0,55 у стенок цилиндрической камеры. При этом, видно, что чем ниже компонента находится в камере смешения, тем ниже будет концентрация в центре камеры и при изменении значения H_0 от 0,6 до 1 м значение выделенной компоненты в центре камеры изменяется от 0,58 до 0,8. Такое влияние изменения высоты камеры на процесс смешивания подтверждает, что, чем ниже выделенная компонента будет находиться в цилиндрической камере, тем ниже будет ее концентрация.

При увеличении среднего радиуса витка спирали r_0 от 0,075 до 0,125 м (рисунок 2.10, б) значение концентрации выделенной компоненты снижается до минимального значения, равного 0,55 у стенок цилиндрической камеры. При этом, видно, что чем больше значение r_0 , тем ниже будет концентрация в центре камеры и при изменении значения r_0 от 0,075 до 0,125 м значение выделенной компоненты в центре камеры изменяется от 0,69 до 0,78. Такое влияние при изменении среднего радиуса витка спирали на процесс смешивания происходит, потому что чем больше значение r_0 , тем больше происходит воздействие сжатого воздуха на смешиваемый материал и минимизируются участки с минимальным воздействием воздуха на компоненты.

2.4 Определение конструктивно-технологических параметров пневматического смесителя

Для определения расхода сжатого воздуха в цилиндрической камере смешивания пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой опишем его движение системой трёх уравнений [2, 11, 24]:

1. Уравнение движения:

$$\frac{dp_{см}}{g\rho} + \vartheta_B \frac{d\vartheta_B}{2g} - \lambda \frac{dx\vartheta_B^2}{2d_0g} = 0, \quad (2.99)$$

где $p_{см}$ – подаваемое давление воздуха в спиральную трубку, Па; λ – коэффициент гидравлического сопротивления [2, 11, 24]:

$$\lambda = 0,067 \left(\frac{158}{Re} + \frac{2k_э}{d_0} \right)^{0,2}, \quad (2.100)$$

где $k_э$ – эквивалентная шероховатость поверхности камеры смешения.

2. Уравнение состояния:

$$p_{см} = \rho R_{\Gamma} T, \quad (2.101)$$

где R_{Γ} - универсальная газовая постоянная, Дж / (моль·К); T – температура воздушного потока, К.

3. Уравнение баланса массового расхода сжатого воздуха, кг/с:

$$G = \rho \vartheta_B S = const, \quad (2.102)$$

где S – сечение отверстия на спиральной трубке, м².

Следовательно:

$$\vartheta_B = \frac{G}{\rho S}. \quad (2.103)$$

Подставив выражения (2.99) в (2.101) и в (2.102) уравнение движения принимает вид:

$$\frac{dp_{см}}{g\rho} = \lambda \frac{dx \vartheta_B^2}{2d_0 g} - \vartheta_B \frac{d\vartheta_B}{2g}. \quad (2.104)$$

Произведем умножение на $\rho_{см}^2$:

$$\rho dp_{см} = \lambda \frac{\vartheta_B^2 \rho^2 dx}{2d_0} - \vartheta_B \frac{d\vartheta_B \rho^2}{2}. \quad (2.105)$$

Подставляя в выражение (2.103) вместо скорости ϑ_B ее значения из уравнения баланса получим:

$$\rho dp_{см} = \frac{\lambda G^2 dx}{S^2 2d_0} - \frac{\vartheta_B d\vartheta_B \rho^2}{2}. \quad (2.106)$$

и подставив (2.101), получаем:

$$\frac{\rho dp_{см}}{R_{\Gamma} T} = \frac{\lambda G^2 dx}{S^2 2d_0} - \frac{\vartheta_B d\vartheta_B \rho^2}{2}. \quad (2.107)$$

Проинтегрируем уравнение в следующих пределах: начальное и конечное давление от $p_{см\text{нач}}$ до $p_{см\text{кон}}$ по высоте камеры от 0 до H_0 и скорости в начале и конце камеры от $\vartheta_{B\text{нач}}$ до $\vartheta_{B\text{кон}}$.

$$\frac{1}{R_{\Gamma} T} \int_{p_{см\text{кон}}}^{p_{см\text{нач}}} \rho dp_{см} = \frac{\lambda G^2}{S^2 2d_0} \int_{H_0}^0 dx - \frac{\rho^2}{2} \int_{\vartheta_{B\text{кон}}}^{\vartheta_{B\text{нач}}} \vartheta_B d\vartheta_B. \quad (2.108)$$

Получим следующее выражение:

$$\frac{(p_{смнач}^2 - p_{смкон}^2)}{R_{гТ}} = \frac{\lambda G^2 H_0}{S^2 2d_0} - \frac{(\vartheta_{внач}^2 - \vartheta_{вкон}^2)\rho^2}{2}. \quad (2.109)$$

Вместо площади подставим ее выражение $(\frac{\pi D^2}{4})$ и получаем:

$$\frac{4\lambda G^2 H_0}{\pi^2 d_0^5} = \frac{(p_{смнач}^2 - p_{смкон}^2)}{R_{гТ}} + \frac{(\vartheta_{внач}^2 - \vartheta_{вкон}^2)\rho^2}{2}. \quad (2.110)$$

Выразив из уравнения (2.103) массовый расход сжатого воздуха G , кг/с, получим:

$$G = \sqrt{\frac{\pi^2 d_0^5 \left(\frac{(p_{смнач}^2 - p_{смкон}^2)}{R_{гТ}} + \frac{(\vartheta_{внач}^2 - \vartheta_{вкон}^2)\rho^2}{2} \right)}{4\lambda H_0}}. \quad (2.111)$$

Построим графики со следующими характеристиками: радиус смесительной камеры $Rk = 0,25$ м, диапазона изменения высоты цилиндрической части корпуса от начала координат до конца цилиндра H_0 от 0,5 до 1,5 м, количество отверстий на спиральной трубке $n = 35$ шт, диапазона изменения диаметра входного отверстия на спиральной энергонесущей трубке d_0 от 0,01 до 0,05 м, средний радиус витков спирали равен $r_0 = 0,125$ м, диаметр выходного патрубка равен $D_0 = 0,05$ м.

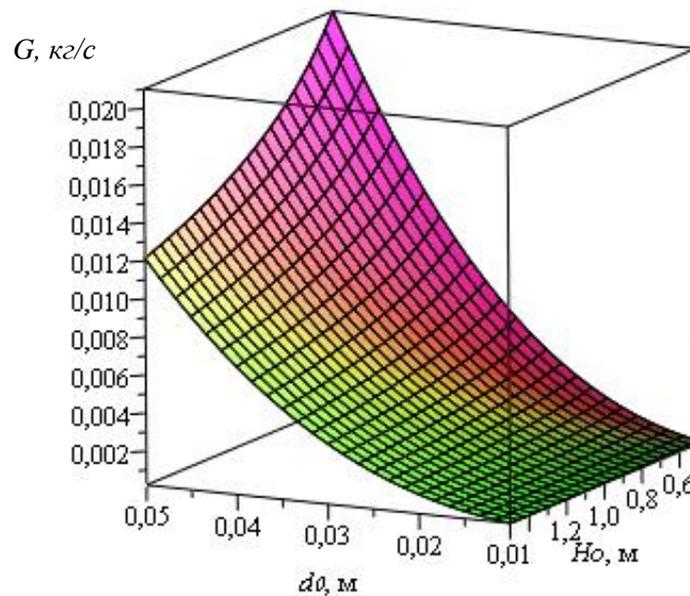


Рисунок 2.11 Зависимость массового расхода воздуха от изменения диаметра спиральной трубки d_0 и высоты камеры H_0 :

при $\vartheta_{внач} = 35$ м/с; $P_{нач} = 150$ КПа; $\rho = 1.225$ кг/м³; $\lambda = 13,6$;

Массовый расход сжатого воздуха в зависимости от варьирования диаметра спиральной трубки d_0 и высоты камеры H_0 (рисунок 2.11) растет при увеличении

пропускной способности диаметра d_0 , м и уменьшении высоты камеры H_0 , м. При изменении диаметра d_0 от 0,01 до 0,05 м возрастает массовый расход воздуха до 0,012 кг/с при $d_0 = 0,05$ м. При увеличении высоты камеры H_0 от 0,5 до 1,5 м массовый расход воздуха увеличивается в интервале от 0,012 до 0,02 кг/с на всем протяжении изменения значений H_0 .

Массовый расход сжатого воздуха в зависимости от изменения диаметра спиральной трубки d_0 и начальной скорости воздуха $v_{\text{нач}}$ (рисунок 2.12, а) носит возрастающий характер, где при изменении диаметра спиральной трубки в интервале от 0,01 до 0,05 м максимальный массовый расход сжатого воздуха принимает значение 0,07 кг/с при $v_{\text{нач}} = 35$ м/с и $d_0 = 0,05$. При изменении скорости сжатого воздуха от 15 до 35 м/с массовый расход сжатого воздуха изменяется в пределах от 0,03 до 0,07 кг/с.

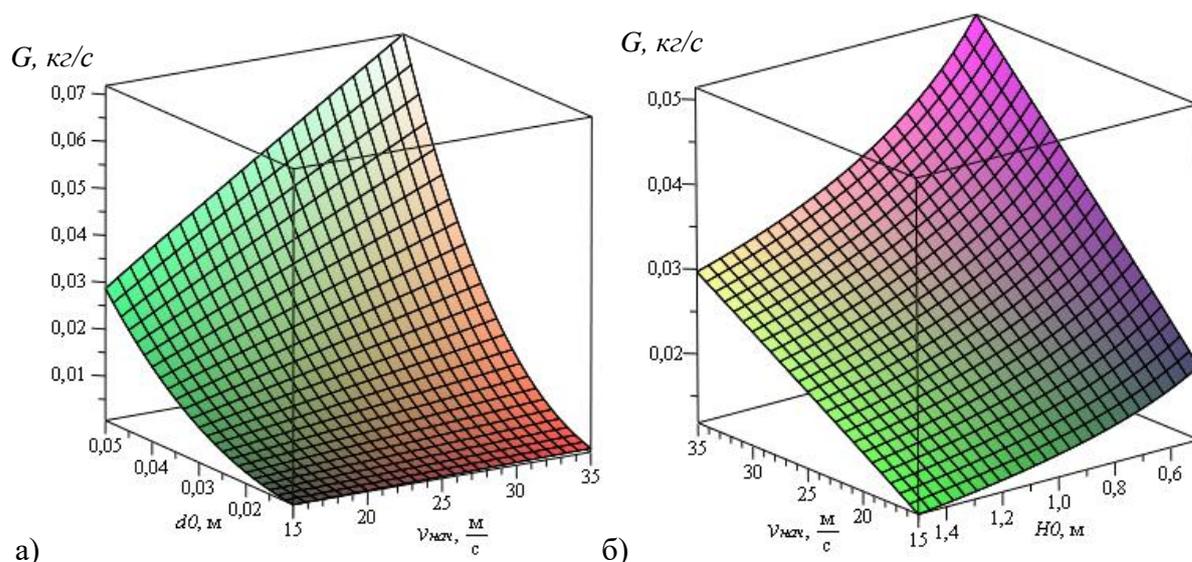


Рисунок 2.12 Зависимость массового расхода воздуха от изменения:
 а - диаметра спиральной трубки d_0 и начальной скорости $v_{\text{нач}}$; б - высоты камеры H_0 и
 начальной скорости $v_{\text{нач}}$;
 при $P_{\text{нач}} = 80$ КПа; $\rho = 1.225$ кг/м³; $\lambda = 13,6$

Массовый расход сжатого воздуха в зависимости от изменения высоты камеры H_0 и начальной скорости сжатого воздуха $v_{\text{нач}}$ (рисунок 2.12, б) при изменении высоты камеры от 0,5 до 1,5 м доходит до максимального значения равного 0,05 кг/с при $v_{\text{нач}} = 35$ м/с и $H_0 = 1,5$ м. При изменении скорости сжатого воздуха от 15 до 35 м/с массовый расход сжатого воздуха изменяется в пределах от 0,03 до 0,05 кг/с.

Объемный расход сжатого воздуха Q_B , м³/с, равен:

$$Q_B = \frac{G}{\rho}. \quad (2.112)$$

Выражение (2.112) позволит рассчитать объёмный расход сжатого воздуха, который необходим для процесса смешивания.

Плотность смешиваемого материала в пылевоздушной среде определяем по следующей формуле, кг/м³ [74]:

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{X}{\rho_{ср}} + \frac{1-X}{\rho}, \quad (2.113)$$

где $\rho_{см}$ – плотность пылевоздушной смеси, кг/м³; $\rho_{ср}$ – средняя плотность смешиваемых компонентов, кг/м³; X - массовая доля твердого вещества в воздухе, кг/кг [74].

Найдем производительность пневматического смесителя, кг/с:

$$Q = \rho_{ср} \vartheta_B \frac{\pi D_0^2}{4}. \quad (2.114)$$

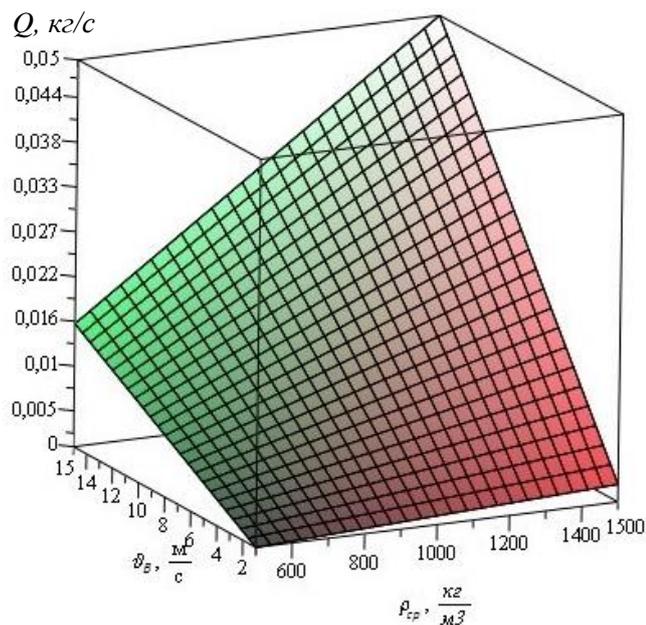


Рисунок 2.13 Зависимость производительности от изменения средней плотности компонентов $\rho_{ср}$ и скорости воздуха ϑ_B при $D_0 = 0,1$ м;

Производительность смесителя в зависимости от изменения средней плотности компонентов $\rho_{ср}$ и увеличения скорости воздуха ϑ_B (рисунок 2.13) в интервале от 1 до 15 м/с принимает значение равное 0,016 кг/с. При изменении средней плотности компонентов в интервале от 500 до 1500 кг/м³

производительность возрастает в пределах от 0 до 0,005 кг/с. Максимальную производительность получим при скорости воздуха 15 м/с и средней плотности компонентов 1500 кг/м³ и она будет равна 0,05 кг/с.

Производительность в зависимости от изменения скорости воздуха v_B и диаметра выходного патрубка D_0 (рисунок 2.14) имеет возрастающий характер. При варьировании диаметра выходного патрубка в интервале от 0,05 до 0,2 м максимальное значение производительности получим при скорости $v_B = 15$ м/с и значении диаметра выходного патрубка $D_0 = 0,2$ м и будет равно 0,099 кг/с, а при наименьшем значении диаметра D_0 на и варьировании скорости потока v_B от 0 до 15 м/с производительность изменяется в диапазоне от 0,002 до 0,008 кг/с, тоже самое происходит при значениях $v_B = 1$ м/с на всем протяжении изменения диаметра выходного патрубка D_0 производительность изменяется в диапазоне от 0,002 до 0,013 кг/с.

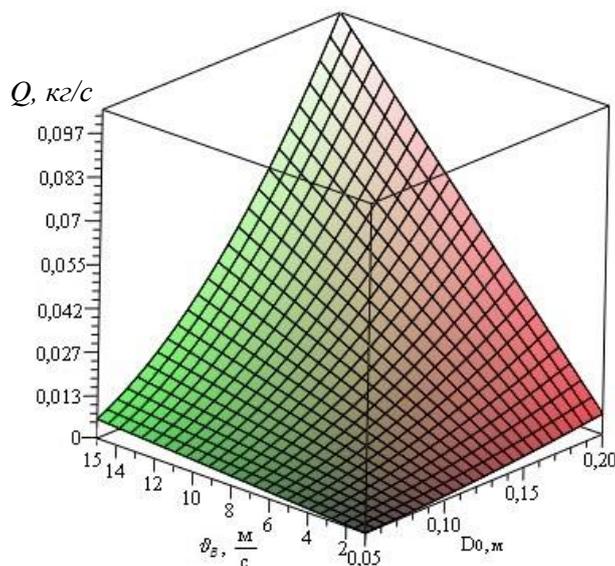


Рисунок 2.14 Зависимость производительности от изменения скорости воздуха v_B и диаметра выходного патрубка D_0 , при $\rho_{cp} = 800$ кг/м³

Для определения, какое потребление массового расхода воздуха необходимо для требуемой производительности, найдем их отношение (рисунок 2.15).

$$k = \frac{G}{Q}. \quad (2.115)$$

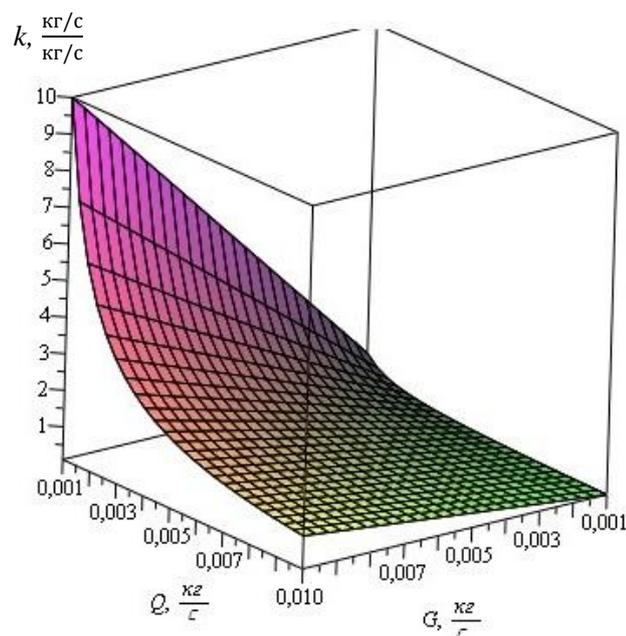


Рисунок 2.15 Зависимость потребления массового расхода от производительности

Из графика следует, что при увеличении значений производительности, потребление сжатого воздуха будет увеличиваться.

2.5 Выводы

1. Выполнена постановка задач и сделаны необходимые допущения для математического описания процесса смешения в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой.

2. Установлены закономерности движения воздушного потока в камере смешения пневматического смесителя. Получены аналитические выражения, определяющие компоненты вектора скорости воздушного потока в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой. Аналитические выражения позволяют определить работоспособность и целесообразность геометрии камеры смешения.

3. Получено аналитическое выражение, описывающее изменение концентрации выделенного компонента в объеме цилиндрической камеры смешения. Установлено, что изменение концентрации зависит, преимущественно, от местоположения частиц в камере, например, возле спиральной трубки на высоте камеры H_0 равной $\frac{1}{2}$ высоты спиральной трубки, концентрация $c = 0,85$.

При этом, чем ниже компонента находится в камере смешения, тем ниже будет концентрация в центре камеры и при изменении значения H_0 от 0,6 до 1 м значение выделенной компоненты в центре камеры изменяется от 0,85 до 0,55. Увеличение среднего радиуса витка спирали r_0 от 0,075 до 0,125 м ведет к улучшению процесса смешивания за счет воздействия сжатого воздуха на смешиваемый материал и минимизации участков с минимальным воздействием воздуха на компоненты. Таким образом, на выходе из цилиндрической камеры у ее стенки концентрация равна 0,55, что не противоречит теории пневматического смешения.

4. Получены аналитические выражения, определяющие основные конструктивно-технологические параметры пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой, которые зависят от технологических параметров пневматического смесителя и физико-механических свойств компонентов смешивания.

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ СМЕСИТЕЛЕ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ

3.1 Основные положения методики экспериментальных исследований

Для подтверждения работоспособности пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой необходимо провести исследования в лабораторных условиях, в результате которых можно определить технологические и эксплуатационные характеристики. Планируя исследования, нужно использовать минимальное количество экспериментов, необходимых с точки зрения рационализации выходных параметров установки. Для исследования процесса смешивания рассматривается множество факторов и выбираются наиболее существенные параметры, влияющие на его работу [55].

Цель экспериментальных исследований в лабораторных условиях состоит в том, чтобы определить влияние параметров разработанной конструкции пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой и режимов его работы на процесс смешивания сухих мелкодисперсных смесей, а также проверки адекватности теоретических исследований [44].

Задачами исследования являются определение рациональных параметров конструкции и выбор технологических параметров рассматриваемого пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой для оптимизации процесса смешивания и достижения максимального эффекта.

Последовательность проведения экспериментов для исследования процесса пневмосмешивания представлена в виде алгоритма (рисунок 3.1).

Определим этапы проведения экспериментального исследования пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой в лабораторных условиях для выполнения поставленных задач:

- создание лабораторной установки для изучения процесса смешивания в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой;
- определение варьируемых параметров и контроль проведения

экспериментов;

- определение критериев оценки качества готовой продукции после смешивания компонентов в пневматическом смесителе;

- выбор плана для проведения многофакторного эксперимента, определение уровней и интервалов варьирования исследуемых параметров процесса смешивания в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой;

- выбор контрольно-измерительного оборудования и методик измерения;

- проведение экспериментов, получение и анализ экспериментальных данных;

- сравнение полученных в ходе экспериментов данных с теоретическими.



Рисунок 3.1 Последовательность проведения экспериментальных исследований

3.2 Описание экспериментальной установки, средств ее контроля и измерения параметров

Для лабораторных исследований процесса смешивания в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой и получения строительной смеси изготовлена лабораторная установка с техническими характеристиками,

указанными в таблице 3.1. Лабораторная установка смесительного комплекса представлена на рисунке 3.2 и состоит: из компрессора для подачи сжатого воздуха (на схеме не показан), шнековых дозаторов 1, шлангов подачи сжатого воздуха 2, пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой 3, бункера пылеразделения 4, патрубка вывода сжатого воздуха 5, рукавного фильтра 6, измерительного прибора 7 и вентилятора низкого давления (на рисунке не показан). Схема лабораторной установки смесительного комплекса представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.2 Лабораторная установка смесительного комплекса:
1 – шнековые дозаторы; 2 – шланги подачи сжатого воздуха; 3 – пневматический смеситель;
4 – бункер пылеразделения; 5 – патрубок вывода сжатого воздуха; 6 – рукавный фильтр;
7 – измерительные приборы

Исследования проводились следующим образом: первоначально проводилась проверка смесительного комплекса продувкой сжатым воздухом без материала, где регулировка давления, подаваемого в пневматический смеситель и в бункер для продувки фильтра осуществлялась при помощи шарового крана.

Дозированная подача компонентов материала осуществлялась через выгрузочный патрубок шнекового дозатора 1 (технические характеристики: диапазон подачи материала 6-30 кг/ч, мощность 0,25 кВт) в корпус смесителя 2 через загрузочный патрубок 3. Скорость подачи материала регулируется в соответствии с требуемым соотношением компонентов смеси.

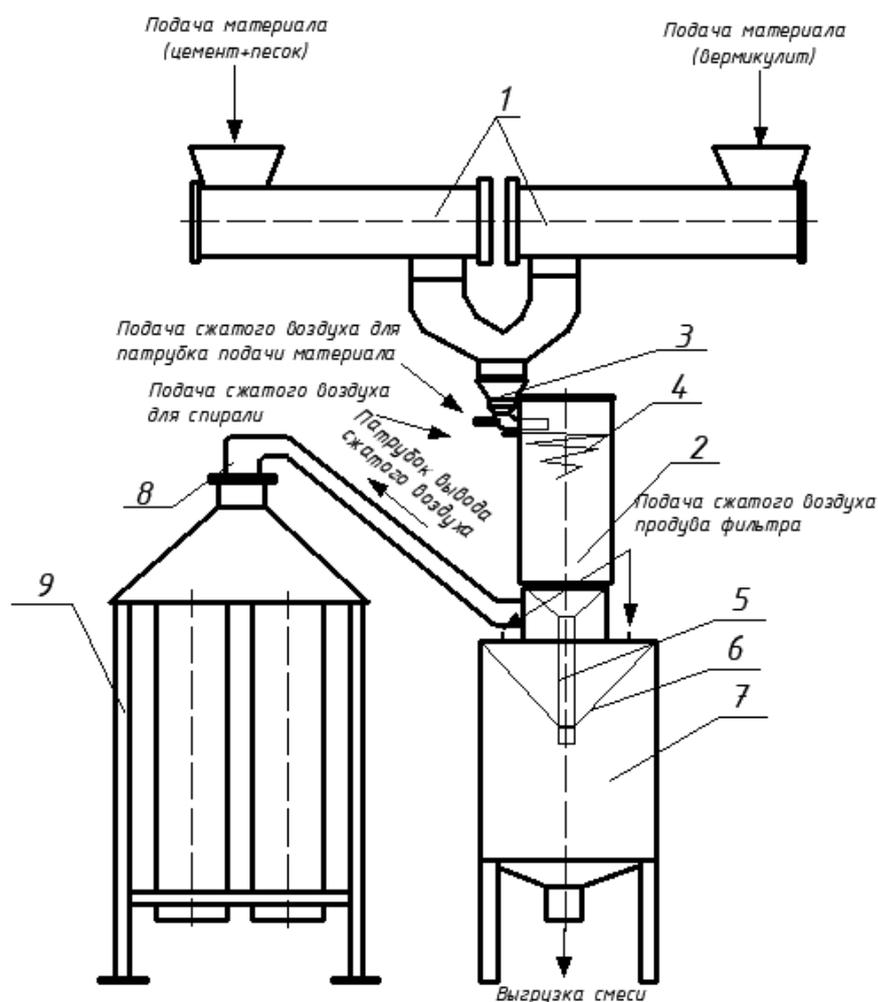


Рисунок 3.3 Схема лабораторной установки смесительного комплекса:
 1 – шнековый дозатор; 2 – камера смешивания; 3 – загрузочный патрубок смесителя;
 4 – спиральная трубка; 5 – труба; 6 – фильтр; 7 – бункер пылеразделения;
 8 – патрубок вывода сжатого воздуха; 9 – рукавный фильтр

Смешивание компонентов осуществляется при помощи сжатого воздуха. Для этого применялся компрессор с ресивером. Технические характеристики компрессора: производительность, м³/с – 0,01; давление, МПа – 0,8; мощность электродвигателя, кВт - 22. В корпусе смесителя 2 компоненты встречаются со сжатым воздухом, который поступает через шланги подачи воздуха, и выходит из отверстий в спиральной энергонесущей трубке 4. За счет вытягивания спиральной

энергонесущей трубки 4 конусом вниз увеличивается площадь взаимодействия энергоносителя с компонентами перемешивания в камере смешивания 2, что обеспечивает увеличение однородности готовой смеси за счет интенсивного воздействия сжатого воздуха на материал. После цикла перемешивания, под нагнетанием компрессора, готовая смесь выходит в трубу 5. Затем она попадает в бункер пылеразделения 6, где сжатый воздух уходит через фильтр 7, оставляя на нем мелкодисперсные частички, и уже очищенный уходит через патрубок вывода сжатого воздуха 8 в рукавный фильтр 9 для дополнительной очистки, а материал остается накапливаться в бункере. Через некоторое время подача сжатого воздуха прекращается и материал выгружается из бункера при открытии затвора. Лабораторная установка смесительного комплекса работает под разряжением за счет установленного вентилятора низкого давления ВНД-17 после рукавного фильтра. Технические характеристики вентилятора: производительность, м³/с – 17-32; давление, КПа – 1,4-2,1; мощность электродвигателя, кВт – 18,5.

Таблица 3.1

Техническая характеристика лабораторной установки пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой

Характеристика	Размерность	Обозначение	Значение
Давление, подаваемое в энергонесущую трубку	КПа	p	50-250
Размер частиц исходного материала	мм	d	$\leq 0,1$
Производительность	кг/ч	Q	≤ 20
Габаритные размеры камеры смешивания: диаметр	м	D	0,400
высота		H	0,900
Габаритные размеры смесительного комплекса: длина	м	L	3
ширина		B	1,5
высота		H	2,5
Масса	кг	m	50

Пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой имеет следующие основные части: загрузочный патрубок (рисунок 3.4), камеру смешивания (рисунок 3.5), спиральную энергонесущую трубку (рисунок 3.6), бункер (рисунок 3.7).

Загрузочный патрубок (рисунок 3.4) состоит из воронки 1, трубы 2 диаметром 0,01 м и соплом 3 с выходным диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Материал сыпается из шнекового дозатора в загрузочную воронку 1, через которую он попадает в камеру смешивания при помощи дополнительной подачи энергоносителя через сопло 3, расположенное в трубе 2. Подается материал в камеру смешивания тангенциально.



Рисунок 3.4 Загрузочный патрубок:
1 – воронка; 2 – труба; 3 – сопло

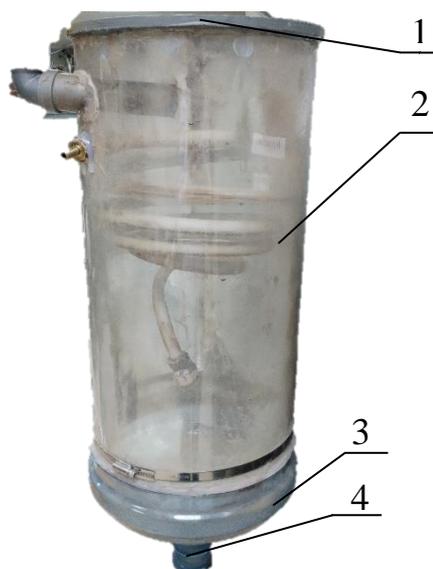


Рисунок 3.5 Камера смешивания:
1 – крышка; 2 – камера; 3 – коническое днище; 4 – выгрузочный патрубок

Камера смешивания (рисунок 3.5) состоит из камеры 2 диаметром 0,4 м и высотой 0,9 м и конического днища 3 высотой 0,15 м с выгрузочным патрубком 4 диаметром 0,04 м и крышкой 1, закрывающей камеру диаметром 0,4 м. В камере смешивания сделано тангенциальное отверстие диаметром $1 \cdot 10^{-2}$ м для крепления загрузочного патрубка на высоте 0,04 м от крышки, для держателей сделаны три

отверстия диаметром $7 \cdot 10^{-3}$ м расположенные под углом 120° в горизонтальной проекции, а для спиральной энергонесущей трубки сделано одно отверстие диаметром 0,015 м, куда будет подаваться энергоноситель. Все эти отверстия находятся на высоте 0,075 м от крышки корпуса.

Спиральная энергонесущая трубка (рисунок 3.6) изготовлена из металлопластиковой трубы круглого сечения и диаметром 0,016 м с отверстиями диаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м и вытянута вниз в виде усеченного конуса. Отверстия на спиральной трубке размещены в шахматном порядке, с равным шагом, а их оси направлены вниз под углом 30° - 35° относительно вертикальной плоскости.



Рисунок 3.6 Спиральная энергонесущая трубка

Бункер (рисунок 3.7) состоит из металлического корпуса 1 с поперечным сечением 0,6х0,6 м и высотой 1,2 м, крышка бункера 2 с габаритными размерами 0,6х0,6 м и отверстием в центре диаметром 0,4 м для выхода сжатого воздуха. На крышке сделаны три отверстия диаметром $6 \cdot 10^{-3}$ м с вставленными в них соплами 3 для очистки фильтра 4, также на крышке размещен цилиндр 5 диаметром 0,4 м и высотой 0,3 м с боковым вставленным патрубком 6 диаметром 0,12 м для вывода сжатого воздуха после прохождения его через фильтр 4. Фильтр 4 расположен в бункере для того, чтобы сжатый воздух, проходя через фильтр, оставлял на нем частички материала и уходил из бункера уже очищенный на дополнительную очистку через рукавный фильтр. Фильтр 4 сверху закреплен металлической рейкой и зажат между крышкой 2 и корпусом 1 при помощи болтовых соединений 7, снизу он закреплен хомутом на трубе вывода смеси 8 в бункер.

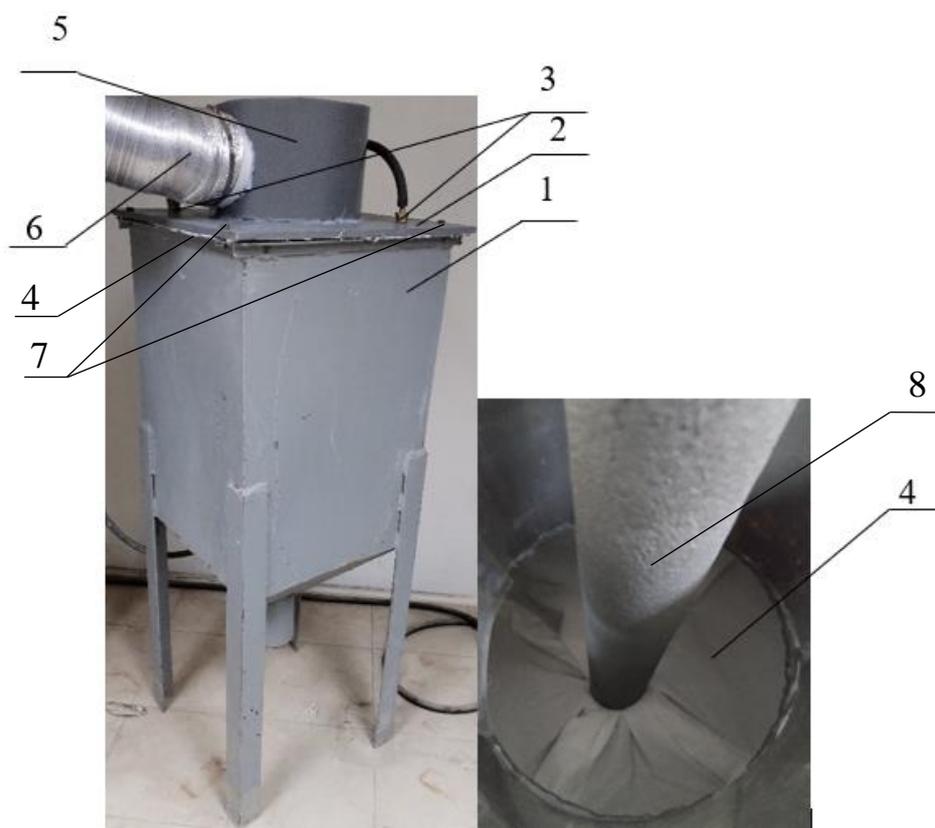


Рисунок 3.7 Бункер пылеразделения:
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – сопла; 4 – фильтр; 5 – цилиндр; 6 – патрубок;
 7 – болтовое соединение; 8 – труба

Оборудование, применяемое при проведении лабораторных исследований:

1. Весы электронные типа CAS SW-10, для взвешивания материала. Максимальная нагрузка – 10 кг, цена деления – 5 г, минимальная нагрузка – 100 г, поверочное деление – 10 г, вид калибровки – внешняя, класс точности - (III) средний, погрешность измерений $\pm 0,5\%$.

2. В качестве источника сжатого воздуха применялся поршневой, V-образный четырехцилиндровый, двухступенчатый компрессор 4ВУ1-5/9М. Производительность компрессора по сжатому воздуху, $\text{м}^3/\text{с}$, – 0,01, избыточное давление – до 0,8 МПа.

3. Манометр типа МП4-Уф для регулировки подаваемого давления. Класс точности 1,5, погрешность при изменении температуры окружающей среды не более $\pm 0,6\%$, диапазон измерения 0–600 КПа.

4. Смеситель со спиральной энергонесущей трубкой. Давление энергоносителя - 100-200 КПа, производительность ≤ 20 кг/ч.

5. Шнековый дозатор для подачи материала в смеситель со следующими характеристиками: диапазон подачи материала 6-30 кг/ч, мощность 0,25 кВт.

6. Рукавный фильтр для очистки пылевоздушного потока от частиц пыли до 5 мкм, производительностью до 500 м³/ч и площадью фильтрования 1 м².

7. Вентилятор низкого давления для разряжения системы смесительного комплекса ВНД-17, производительность, м³/с – 17-32; давление, КПа – 1,4 – 2,1; мощность электродвигателя, кВт – 18,5.

3.3 Физико-механические свойства материала, используемого при проведении исследований

Исследования ученых [8, 65, 85-86, 121, 148] показывают, что использование вермикулита в ССС оказывает положительное влияние на их свойства и подходит для создания чистых и экологичных стройматериалов. При его использовании в качестве наполнителя уменьшается удельный вес и коэффициент теплопроводности изделия, что влияет на характеристики теплоизоляции, а значит такие растворы можно применять, как теплоизоляционные. Такие смеси и растворы на основе вермикулита обладают высокими акустическими, огнезащитными и антиконденсатными свойствами. Раствор на основе вермикулита с высокими теплоизоляционными свойствами позволяет снизить нагрузку за счет низкой плотности смеси. Свойства таких ССС в некоторых случаях могут превосходить импортные теплоизоляционные материалы, используется местное сырье и отходы производства вспученного вермикулита, что дает экономические и экологические преимущества. Теплоизоляционная смесь должна соответствовать требованиям основных свойств теплоизоляционного раствора, исходя из разработанной рецептуры, но при отсутствии российских стандартов на эти материалы, допустимо применять стандарты на проведение испытаний по ГОСТ 28013-98, ГОСТ 5802-86 и промышленным стандартам Германии (DIN 18555, DIN 52615, DIN 52617 и др.) и европейскому стандарту EN 998. Основное требование к таким растворам - минимальный допустимый предел прочности (1,0 МПа, DIN 18550). Необходимая

устойчивость теплоизоляционного материала к внешним воздействиям и достаточная трещиностойкость выполняется при показателе прочности на сжатие раствора от 1 до 5 МПа. Раствор с такими показателями выдерживает небольшие деформации и сопротивляется растрескиванию [25, 38, 65, 124].

В диссертационной работе был рассмотрен и проанализирован состав теплоизоляционного материала в соотношении 1:1:2:

- портландцемент ПЦ М500;
- вспученный вермикулит;
- кварцевый песок фракционированный.

Во время проведения лабораторных исследований для определения однородности и прочностных характеристик полученной смеси дополнительные добавки не использовались.

Цемент М500 Д0 – вяжущее, которое изготавливается из чистого клинкера и соответствует требованиям ГОСТ 31108-2003. Портландцемент не содержит синтетических добавок, но в его составе преобладают силикаты кальция [34, 36, 84, 92].

Основные свойства М500 Д0 по ГОСТу:

- прочность на сжатие – 49 МПа;
- морозостойкость – F70;
- высокий уровень водоотталкивающих свойств;
- скорость схватывания – от 45 мин до 10 ч (зависит от температуры окружающей среды);
- плотность насыпная – 1200 кг/м³;
- размер частиц 20 мкм.

Кварцевый песок без органических и других примесей, сухой, с процентным содержанием влаги не более 5 %. Содержание кварца в песке не менее 70 %.

Кварцевый песок обладает следующими свойствами:

- размер частиц 0,1 мм;
- истираемость – 0,1;
- твердость – 7 (по шкале Мооса);

- высокая морозостойкость, не боится перепадов температур;
- насыпная плотность кварцевого песка — 1300 кг/м^3 ;
- присутствие засоряющих и глинистых частиц допускается до 0,5%.

Вермикулит – это натуральный природный материал многослойной структуры на основе пластинчатых кристаллов, содержащий в своем составе целый ряд металлов (железо, алюминий, кремний, магний) и их оксиды в соединении с водой. Сухие строительные смеси с входящими в их состав вермикулитом, цементом и песком (или без него) имеют большую разновидность различной рецептуры теплоизоляционного и конструкционно-теплоизоляционного назначения. Добавление в состав мелких фракций вспученного вермикулита при прочих равных условиях дает более однородное распределение пористости по всему объему ССС, уменьшает размеры пор и, тем самым, снижает теплопроводность бетона (за счет уменьшения конвективного теплообмена в порах), увеличивает прочность и выход объема смеси. Это происходит за счет меньшего смятия и поломки зерен вермикулита в цементном тесте при приготовлении смеси.

Вермикулит обладает следующими характеристиками:

- плотность – 150 кг/м^3 ;
- размер частиц 0,1 мм;
- коэффициент теплового расширения — 0,000014;
- твердость по минералогической шкале – 1,5;
- коэффициент звукопоглощения – 0,7–0,8;
- теплопроводность – $0,05\text{--}0,09 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
- стойкость к воздействию агрессивных сред, бактерий и на поверхности не образует плесень;
- гигроскопичность;
- коэффициент звукового поглощения до 0,8;
- экологичность.

3.4 Описание методики проведения экспериментов

В начале проведения лабораторных исследований были определены основные показатели эффективности работы пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой. Для определения производительности, однородности и предела прочности на сжатие готовой смеси после смешивания в пневмосмесителе проводим эксперименты с варьируемыми параметрами (ψ – коэффициент загрузки материала, %, H – шаг спирали, мм, n – количество отверстий на спирали, шт, p – давление подаваемое в энергонесущую трубку, КПа).

3.4.1 Определение прочности готового продукта

Определение прочности готового продукта проводится согласно ГОСТ 5802-86.

Применяемое лабораторное оборудование:

- разъемные стальные формы по ГОСТ 22685;
- пресс гидравлический П 50 с техническими характеристиками: наибольшая создаваемая нагрузка, 500 кН; диапазон измерения основной/дополнительный, 50-500 кН; погрешность при нагружении, % ± 2 ; размеры плит сжатия 0,320x0,320 м; мощность 1,2 кВт;
- штангенциркуль ШЦ-П- 400-0,05, размер шага 0.05 мм, погрешность измерений 0,03 мм;
- стержень стальной диаметром 12 мм, длиной 300 мм по ГОСТ 58767-2019;
- шпатель.

Раствор для определения прочности готового продукта подготавливался следующим образом:

1. Сухие компоненты смеси в требуемом соотношении, дозировано подавались в пневматический смеситель для смешивания.

2. После смешивания в пневматическом смесителе смесь помещают в сухие полиэтиленовые пакеты и герметично завязывают.

3. Сухую смесь помещаем в чашу сферической формы, протертую влажной тканью.

4. Выливаем воду в углубление в сухой смеси объемом исходя из В/Т отношения равного 0,6.

5. Осторожно смешиваем смесь лопаткой до однородной консистенции раствора.

6. Пробу для проведения испытания берем до начала схватывания раствора, сразу по окончанию процесса смешивания.

7. Испытание начинается сроком не позднее, чем через 10 мин после отбора пробы.

8. Внутренние поверхности форм образцов для испытания смазали тонким слоем смазки.

9. Заполняем форму раствором в два слоя и уплотняем двенадцатью нажимами шпателя вдоль одной стороны и перпендикулярно другой, избыток смеси убираем смоченной стальной линейкой по краям формы.

10. Освобождаем образцы из форм через 24 ± 2 ч после укладки.

11. Далее образцы в первые 3 сут храним в камере нормального хранения при относительной влажности воздуха 95-100 %, а остальное, до испытания время — в помещении при относительной влажности воздуха (65 ± 10) %.

12. Перед проведением испытания взвешиваем образец с погрешностью до 0,1% и измеряем штангенциркулем до 0,1 мм.

13. Необходимая температура помещения для проведения испытания должна быть (20 ± 2) °С, относительная влажность воздуха 50-70 %. Температуру и влажность помещения измеряют аспирационным психрометром типа МВ-4.

14. Для проведения испытаний необходимо приобретать приспособления (сосуды, формы), изготовленные из стали, стекла или пластмассы.

Проведение испытания прочности на сжатие готовой смеси:

1. Перед проведением испытания необходимо удалить остатки растворов с

предыдущего испытания. Лабораторный образец устанавливают на нижнюю плиту пресса.

2. Шкалу силоизмерителя пресса выбирают при условии, что значение разрушающей нагрузки будет в интервале 20-80 % от максимальной нагрузки, допускаемой выбранной шкалой.

3. Нагрузка на образец осуществляется непрерывно со скоростью $(0,6 \pm 0,4)$ МПа в секунду пока не произойдет разрушение образца. Усилие, при котором произошло разрушение лабораторного образца принимается за величину нагрузки.

Предел прочности на сжатие R вычисляют как:

$$R = \frac{P}{A}, \quad (3.1)$$

где $P_{\text{раз}}$ - разрушающая нагрузка, Н; A - площадь сечения лабораторного образца, м^2

Площадь сечения образцов определим как среднеарифметическое площадей двух противоположных граней. Предел прочности на сжатие определим как среднеарифметическое испытаний трех образцов.

3.4.2 Определение критерия качества смеси

При оценивании качества готовой смеси, получаемой в пневматическом смесителе, использовался метод точечного отбора проб [28, 57, 68]. Этот метод позволит выявить застойные зоны в смесителе.

Самым распространенным методом определения коэффициента неоднородности по ключевому компоненту является метод А.М. Ластовцева:

$$V_c = \frac{100}{c_0} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - c_0)^2}{n_{\text{проб}} - 1}}, \quad (3.2)$$

Значение коэффициента неоднородности зависит от массы пробы, взятой во время проведения лабораторного эксперимента. Стандартное отклонение пропорций компонентов в самом образце зависит от количества составляющих частиц, это означает, что отобранная для анализа проба имеет такой вес, чтобы отклонения пропорций не влияли на распределение компонентов в смеси.

Качество конечной смеси более точно характеризуется минимальной массой образца [94, 120]. В то же время нельзя намного уменьшить массу образца. Это связано с тем, что отдельные частицы смешанных компонентов появляются в малом объеме в любой точке камеры смешивания случайным образом. В таком случае коэффициент неоднородности V_c образцов из одной смеси будет содержать различный результат и не покажет действительное распределение компонентов. Следовательно, минимальный вес пробы G_M , гр., который покажет достоверность оценки качества определим как [22]:

$$G_M = \frac{n_q \cdot 100}{c_0} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot \rho_M, \quad (3.3)$$

где n_q – число частиц ключевого компонента в пробе минимального веса; $c_{зад}$ – заданная концентрация ключевого компонента, %; d – диаметр частиц смеси, м.

Для определения массы проб использовали электронные весы CAS SW-10 с погрешностью 0,5 г.

3.5 Методология планирования экспериментальных исследований

Планирование экспериментов дает возможность проводить минимально-необходимое количество опытов с теми условиями, которые осуществляют рационализацию выходных параметров [44, 55, 133]. Идеализация динамической модели пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой позволяет найти рациональные значения параметров оборудования. Для этого используется композиционный план полнофакторного эксперимента.

Во время планирования лабораторных исследований принимаем план полнофакторного эксперимента ПФЭ ЦКРП 2⁴. Математическое описание плана полного факторного эксперимента можно записать в виде уравнения регрессии:

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j \cdot x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^k a_{uj} \cdot x_u \cdot x_j + \sum_{j=1}^k a_{jj} \cdot x_j^2, \quad (3.4)$$

где y – функция отклика; a_0 – свободный коэффициент уравнения регрессии; a_j – коэффициенты при линейной зависимости; a_{uj} – коэффициенты при парном

взаимодействии факторов; a_{jj} – коэффициенты при квадратичном взаимодействии факторов; x_u, x_j – исследуемые независимые переменные.

Значимость коэффициентов проверяется по критерию Стьюдента [55]:

$$t = \frac{|a_j|}{S_{\{b_j\}}}, \quad (3.5)$$

где a_j – коэффициент при факторах варьирования в уравнении регрессии; $S_{\{b_j\}}$ – квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

При проверке адекватности используем критерий Фишера [133]. Во время проведения лабораторных экспериментов необходимо определенное количество измерений и есть вероятность возникновения как случайной погрешности, так и погрешности на контрольно-измерительных приборах.

Суммарную погрешность можно определить как [44]:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{случ}})^2 + (\sigma_{\text{приб}})^2}, \quad (3.6)$$

где $\Delta x_{\text{случ}}$ – случайная погрешность измерений; $\sigma_{\text{приб}}$ – приборная погрешность.

В качестве исследуемых факторов при проведении экспериментов для смешивания сухих строительных смесей в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой принимаем:

$p (x_1)$ – давление, подаваемое в энергонесущую трубку, 50-250 КПа;

$n (x_2)$ – количество отверстий на спирали, 15-55 шт;

$\psi (x_3)$ – коэффициент загрузки материала, 50-90 %;

$H (x_4)$ – шаг спирали, 10-50 мм.

В качестве функций отклика на воздействие факторов, определяющих характер протекания процесса, выбраны: часовая производительность Q , кг/ч, коэффициент неоднородности смеси V_c , %, предел прочности на сжатие образцов $\delta_{\text{сж}}$, МПа, плотность ρ , кг/м³.

В соответствии с планом принято пять уровней факторов: 1 – нижний; 0 – средний; +1 – верхний; -2 и +2 – звёздные точки. Данные уровни факторов выполняются на экспериментальной установке и соотносятся с реальными условиями пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой для

смешивания мелкодисперсных смесей.

Использование выбранного плана позволило сократить число опытов при исследовании влияния конструктивно-технологических параметров на процесс смешивания до N , равного:

$$N = 4 \cdot n_1 \cdot \frac{\sigma_n^2}{\sigma_{\text{приб}}^2}, \quad (3.7)$$

где n_1 – количество измерений; σ_n^2 – значение полученной погрешности измерений; $\sigma_{\text{приб}}^2$ – значение приборной погрешности.

На основании проведенных поисковых экспериментов были установлены уровни варьирования входных факторов экспериментальных исследований и составлена матрица плана проведения эксперимента (таблица 3.2).

При проведении экспериментов физико-химический состав материала оставался неизменным.

Таблица 3.2

Матрица планирования ПФЭ ЦКРП 2⁴

№п/п	Давление, КПа	Количество отверстий, шт	Коэффициент загрузки материала, %	Шаг спирали, мм
	X_1/p	X_2/n	X_3/ψ	X_4/H
1	-1/100	-1/25	-1/60	-1/20
2	1/200	-1/25	-1/60	-1/20
3	-1/100	1/45	-1/60	-1/20
4	1/200	1/45	-1/60	-1/20
5	-1/100	-1/25	1/80	-1/20
6	1/200	-1/25	1/80	-1/20
7	-1/100	1/45	1/80	-1/20
8	1/200	1/45	1/80	-1/20
9	-1/100	-1/25	-1/60	1/40
10	1/200	-1/25	-1/60	1/40
11	-1/100	1/45	-1/60	1/40
12	1/200	1/45	-1/60	1/40
13	-1/100	-1/25	1/80	1/40
14	1/200	-1/25	1/80	1/40
15	-1/100	1/45	1/80	1/40
16	1/200	1/45	1/80	1/40
17	-2/50	0/35	0/70	0/30
18	2/250	0/35	0/70	0/30
19	0/150	-2/15	0/70	0/30
20	0/150	2/55	0/70	0/30
21	0/150	0/35	-2/50	0/30
22	0/150	0/35	2/90	0/30

23	0/150	0/35	0/70	-2/10
24	0/150	0/35	0/70	2/50
25	0/150	0/35	0/70	0/30
26	0/150	0/35	0/70	0/30
27	0/150	0/35	0/70	0/30
28	0/150	0/35	0/70	0/30
29	0/150	0/35	0/70	0/30
30	0/150	0/35	0/70	0/30
31	0/150	0/35	0/70	0/30

Степень значимости факторов определим при помощи коэффициента эластичности, который покажет насколько в процентном соотношении изменяется функция, если аргумент изменится на единицу (1%):

$$\varepsilon_i = \frac{a_i x_{i0}}{a_0}, \quad (3.8)$$

где x_{i0} – натуральное значение основного (нулевого) уровня фактора; a_i, a_0 – коэффициенты регрессии.

Значимость коэффициентов определяется из выражения:

$$\xi = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\Sigma}}. \quad (3.9)$$

Для подробного анализа уравнения и его интерпретации в графический вид декодируем уравнения регрессии в натуральный вид. Для этого воспользуемся формулами (3.13) - (3.17):

$$x_k = \frac{x_n - x_{cp}}{\Delta}, \quad (3.10)$$

где x_k – обозначение исследуемого фактора в кодированном виде; x_n – обозначение исследуемого фактора в натуральном виде; x_{cp} – значение нулевого уровня исследуемого фактора; Δ – шаг варьирования.

Используя формулу (3.10), найдем значение каждого исследуемого фактора в натуральном виде:

$$\text{Для } X_1 \quad X_1 = \frac{p-1,5}{0,5}, \quad (3.11)$$

$$\text{Для } X_2 \quad X_2 = \frac{n-35}{10}, \quad (3.12)$$

$$\text{Для } X_3 \quad X_3 = \frac{\psi-70}{10}, \quad (3.13)$$

Для X_4

$$X_4 = \frac{H-30}{10}. \quad (3.14)$$

3.6 Выводы

1. В соответствии с целью и задачами исследований разработан алгоритм проведения исследований в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой.

2. Разработана и изготовлена установка пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой для проведения лабораторных исследований.

3. Описано используемое оборудование, необходимое для проведения исследований на лабораторной установке, а также описаны физико-механические свойства компонентов готовой смеси.

4. Описана методика проведения экспериментов в лабораторных условиях на пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой.

5. Разработан план для проведения многофакторного эксперимента, а также определены исследуемые факторы и уровни варьирования.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ

4.1 Обоснование выбора функций отклика и основных факторов

Для проверки правильности выбора расчетных схем определения теоретической зависимости производительности и концентрации ключевого компонента в смеси, а также определения рациональных параметров смешивания в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой при получении теплоизоляционных материалов с требуемыми техническими характеристиками, были проведены исследования изменения коэффициента неоднородности смеси V_c , %, предела прочности образца на сжатие $\delta_{сж}$, МПа, и изменения производительности смесителя Q , кг/ч, от основных факторов. На процесс смешивания в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой влияют следующие факторы:

$$Q, V_c, \sigma_{сж} = f(p, n, \psi, H, d_{тр}, d_{кам}, h_{кам}, \alpha_{отв}), \quad (4.1)$$

где p – давление сжатого воздуха в камере смешивания, КПа; n – количество отверстий на спирали, шт.; ψ – коэффициент загрузки материала, %; H – шаг витков спирали, м; $d_{тр}$ – диаметр энергонесущей трубки, м; $d_{кам}$ – диаметр камеры смесителя, м; $h_{кам}$ – высота камеры смесителя, м; $\alpha_{отв}$ – угол наклона отверстия на спиральной энергонесущей трубке, град.

Давление сжатого воздуха p , подаваемого в пневматический смеситель, варьируется от минимального 50 КПа, при значении ниже которого процесс смешивания будет происходить мало эффективно, до максимального 250 КПа (рисунок 4.1). При увеличении которого происходит перерасход сжатого воздуха, а качественные показатели смеси при этом будут практически без изменений. Интервал указанных значений определяется предварительно при помощи имитационного моделирования [111], а затем опытным путем [113].

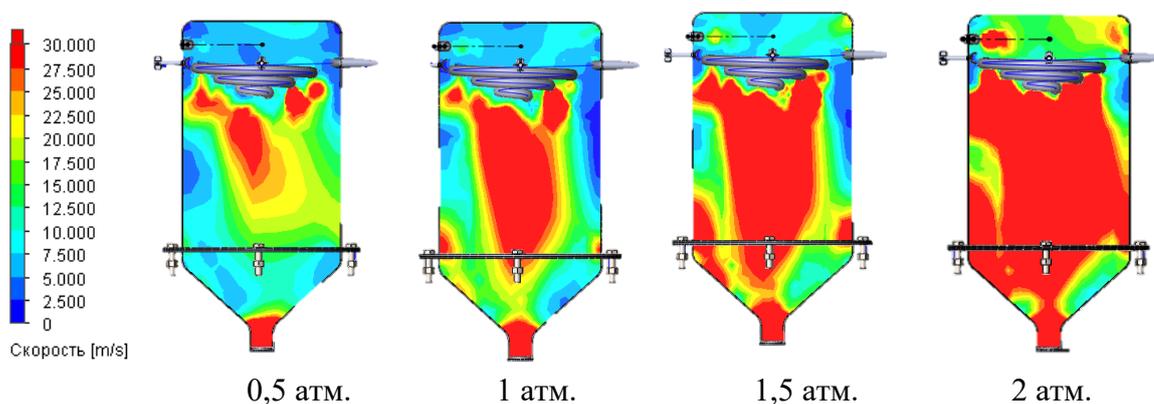


Рисунок 4.1 Изменение поведения воздушного потока от перемены значений давления подаваемого воздуха в спиральную трубку

Коэффициент загрузки материала ψ оказывает существенное влияние на производительность пневматического смесителя и процесс смешивания в нем, его значения принимаются в диапазоне 50-90%. При загрузке камеры меньше, чем 50% - смешивание нецелесообразно из-за низкой производительности и перерасхода воздуха, а загрузка более чем на 90% приведет к снижению качества перемешивания из-за повышенной плотности потока материала, который затрудняет процесс смешивания [66, 67].

Согласно источнику [72] для пневматических смесителей $h = 2d_{кам}$, а $d_{тр} = d_{кам}/(20...30)$, поэтому, для исследуемого образца принимаем $d_{кам} = 0,4$ м, $h_{кам} = 0,8$ м, а диаметр разгонной энергонесущей трубки принимается равным $d_{тр} = 0,016$ м. Что подтверждено экспериментально, так как при этих значениях создан поток сжатого воздуха, который обеспечивает достаточную интенсивность перемешивания и не допускает перерасхода сжатого воздуха.

Количество отверстий на спирали n также оказывает влияние на качество готовой смеси, интервал их варьирования выбран в диапазоне 15-55 шт. (рисунок 4.2), на основе проведенного имитационного моделирования. Так установлено [110, 111, 113], что при максимальном значении отверстий на спиральной трубке равном 55 шт. и более, происходит перерасход сжатого воздуха и появляется необходимость увеличения диаметра камеры смешивания. При значении в 15 шт. и менее отверстий в области спиральной трубки появляются застойные зоны, которые негативно влияют на процесс смешивания и качество смеси.

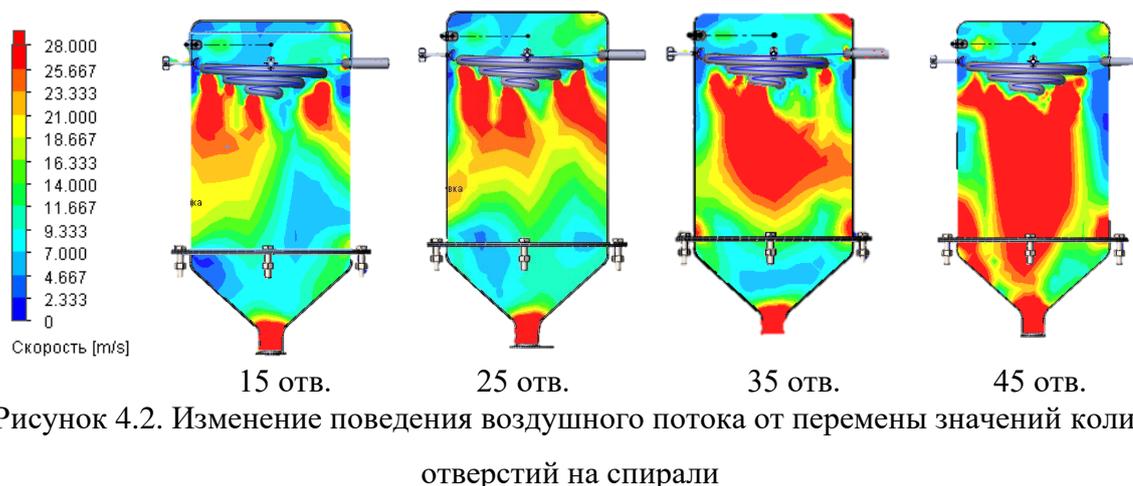


Рисунок 4.2. Изменение поведения воздушного потока от перемены значений количества отверстий на спирали

Угол направления струи потока сжатого воздуха был задан постоянным равным 35° , который обеспечивает максимальное заполнение рабочей зоны камеры смешивания сжатым воздухом [110, 111, 113].

Шаг спирали H изменяется в диапазоне 0,010-0,050 м, где шаг 0,050 м позволит распределить спиральную энергонесущую трубку по всей длине камеры, обеспечивается равномерное распределение сжатого воздуха для его взаимодействия с компонентами смеси по всему объему камеры. При шаге спирали 0,010 мм компоненты смеси беспрепятственно проходят через витки спирали, а воздействие сжатого воздуха на материал будет ограничено, так как спиральная трубка занимает 1/3 камеры по высоте.

Таким образом, основные параметры варьируются в пределах (таблица 4.1): давление сжатого воздуха $p = 50-250$ КПа, количество отверстий на спирали $n = 15-55$ шт, коэффициент загрузки $\psi = 50-90\%$, и шаг спирали $H = 0,010-0,050$ м.

Таблица 4.1

Исследуемые факторы и уровни варьирования ПФЭ ЦКРП 2⁴

Исследуемый фактор	Обозначение	Уровень варьирования					Интервал
		-2	-1	0	1	+2	
Давление, подаваемое в энергонесущую трубку, КПа	x_1/p	50	100	150	200	250	50
Количество отверстий на спирали, шт.	x_2/n	15	25	35	45	55	10
Коэффициент загрузки материала, %	x_3/ψ	50	60	70	80	90	10
Шаг спирали, мм	x_4/H	10	20	30	40	50	10

В состав испытуемой смеси входит портландцемент, кварцевый песок и вермикулит в соотношении 1:1:2 соответственно. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Полученные результаты экспериментальных исследований

№ опыта	Варьирование фактора				Исследуемые параметры		
	p , КПа	n , шт	ψ , %	H , мм	Q , кг/ч	V_c , %	$\sigma_{сж}$, МПа
1	100	25	60	20	12.4	11,1	5.3
2	200	25	60	20	13.1	8,4	4.1
3	100	45	60	20	13.7	5,5	4
4	200	45	60	20	13.9	5,2	3,9
5	100	25	80	20	13	11	5,1
6	200	25	80	20	13.02	10,6	4,9
7	100	45	80	20	14.65	5,5	4
8	200	45	80	20	13.5	3,1	3,3
9	100	25	60	40	12.8	3	3,2
10	200	25	60	40	12.2	5,5	4
11	100	45	60	40	14.25	3	3,2
12	200	45	60	40	14.5	3,5	3,3
13	100	25	80	40	10.3	7,6	4,2
14	200	25	80	40	12.7	5,1	3,8
15	100	45	80	40	15.2	4,7	3,5
16	200	45	80	40	15.4	3,1	3,3
17	50	35	70	30	10.1	12,8	5,2
18	250	35	70	30	16.8	2,7	2,5
19	150	15	70	30	14.6	8,9	4,7
20	150	55	70	30	15.3	2,8	2,9
21	150	35	50	30	15.8	3	3,1
22	150	35	90	30	14.1	3,7	3,25
23	150	35	70	10	14	3	2,9
24	150	35	70	50	14.6	3,5	3,2
25	150	35	70	30	14.8	3	3
26	150	35	70	30	14.7	2,9	2,85
27	150	35	70	30	14.5	2,95	2,9
28	150	35	70	30	14.3	3	3
29	150	35	70	30	14.6	3,2	3,1
30	150	35	70	30	14.7	3,4	3,15
31	150	35	70	30	15.1	3,3	3,1

4.2 Анализ зависимости производительности от основных параметров пневматического смесителя со спиральной энергоносущей трубкой

На основании полученных значений после проведения лабораторных

экспериментов (табл. 4.2) получено уравнение регрессии производительности в кодированном виде:

$$Q = 13,63 - 0,47 \cdot x_1 + 0,6 \cdot x_2 - 0,18 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_4 - 0,46 \cdot x_1^2 - 0,08 \cdot x_2^2 - 0,086 \cdot x_3^2 - 0,25 \cdot x_4^2 - 0,188 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,05 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,155 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0,24 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,44 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,076 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (4.2)$$

В натуральном виде получим уравнение:

$$Q = 12,07 + 0,04 \cdot p - 0,127 \cdot n + 0,026 \cdot \psi - 0,0016 \cdot H - 0,00018 \cdot p^2 - 0,0008 \cdot n^2 - 0,0008 \cdot \psi^2 - 0,0025 \cdot H^2 - 0,0003 \cdot p \cdot n + 0,0001 \cdot p \cdot \psi + 0,0003 \cdot p \cdot H + 0,0024 \cdot n \cdot \psi + 0,0044 \cdot n \cdot H - 0,0007 \cdot \psi \cdot H. \quad (4.3)$$

При определении наибольшего значения функции отклика производительности в области варьирования параметров: $p = 50-250$ КПа, $n = 15-45$ шт, $\psi = 50-90\%$, $H = 10-50$ мм получили следующие максимальные и минимальные значения экстремума функций:

- $Q_{max} = 15,01$ кг/ч, $H = 36,16$ мм, $n = 45$ шт, $P = 125$ КПа, $\psi = 75\%$;
- $Q_{min} = 5,4$ кг/ч, $H = 50$ мм, $n = 15$ шт, $P = 50$ КПа, $\psi = 90\%$.

Проверка адекватности регрессионного уравнения проводится по критерию Фишера по условию:

$$F_p \leq F_{табл}, \quad (4.4)$$

$$3,9 \leq 4,06.$$

Следовательно, уравнение регрессии адекватно.

Оценка значимости факторов производилась с помощью критерия Стьюдента (t_p) по условию:

$$t_p > s_b t_{табл}, \quad (4.5)$$

где t_p - коэффициент фактора; s_b - ошибка в определении коэффициента регрессии; $t_{табл}$ - табличное значение критерия Стьюдента.

$$14,6 > 0,02 \cdot 2,45; 0,47 > 0,007 \cdot 2,45; 0,59 > 0,007 \cdot 2,45; 0,04 > 0,007 \cdot 2,45;$$

$$0,18 > 0,007 \cdot 2,45; 0,05 > 0,009 \cdot 2,45; 0,15 > 0,009 \cdot 2,45; 0,24 > 0,009 \cdot 2,45;$$

$$0,4 > 0,009 \cdot 2,45; 0,07 > 0,009 \cdot 2,45; 0,46 > 0,006 \cdot 2,45; 0,08 > 0,006 \cdot 2,45;$$

$$0,08 > 0,006 \cdot 2,45; 0,29 > 0,006 \cdot 2,45.$$

Следовательно, все коэффициенты значимы.

Однородность оценок дисперсий определялась при помощи критерия Кохрена при выполнении следующего условия:

$$k_{кр} < k_{кр_{табл}}, \quad (4.6)$$

где $k_{кр}$ – вычисленная дисперсия; $k_{кр_{табл}}$ – табличное значение критерия Кохрена.

$$0.09 < 0.15.$$

Следовательно, опыты можно считать воспроизводимыми.

Анализ уравнения регрессии (4.2) производительности Q смесителя, где количество отверстий на спиральной энергонесущей трубки x_2 (n) имеет положительное (+) значение и при увеличении этого фактора повышается производительность смесителя.

Факторы (давление, подаваемое в спиральную трубку x_1 (p), коэффициент загрузки x_3 (ψ) и шаг спирали x_4 (H)) имеют отрицательные значения (-), поэтому снижают значение производительности при их увеличении. Так как диаметр выходного отверстия остается неизменным, то при увеличении давления x_1 (p) и увеличении коэффициента загрузки материала x_3 (ψ) в смесительной камере начинает накапливаться избыточное давление, что затрудняет выход материала из него, что снижает производительность (Q). Так как отверстия на спиральной трубке расположены равномерно, то при увеличении шага спирали x_4 (H) воздействие на материал будет происходить не в одной зоне смесителя, а равномерно по всей камере, и как отмечено выше, при увеличении давления x_1 (p), подаваемого в спиральную трубку, движение материала по камере будет затруднено.

Была определена значимость факторов (3.11) для производительности пневматического смесителя (рисунок 4.3), которая показала, что наибольшее влияние оказывает значение количества отверстий на спиральной трубке и подаваемое в нее давление равные 54% и 34% соответственно.

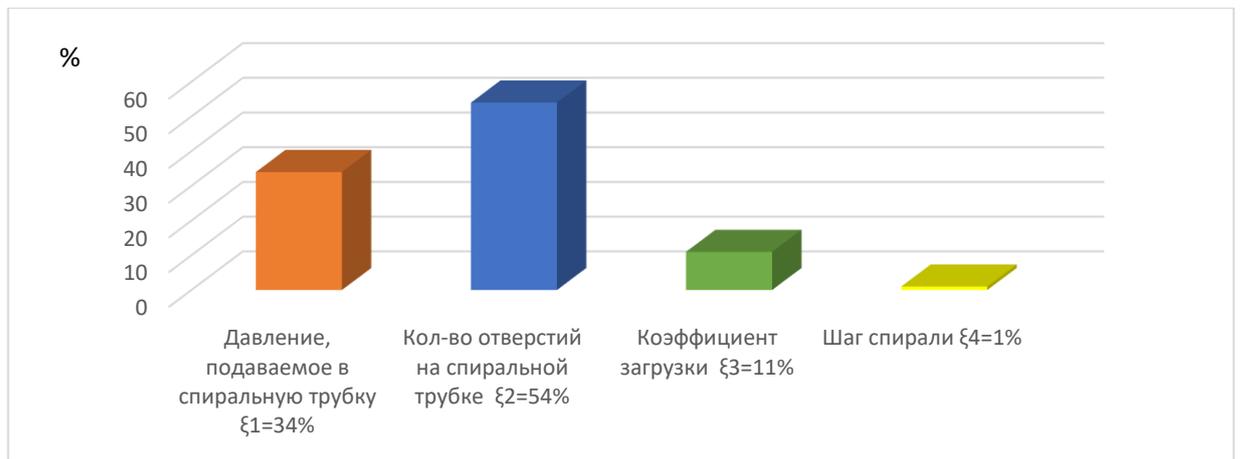


Рисунок 4.3 Диаграмма значимости факторов для производительности

Для определения рациональных параметров пневматического смесителя, которые дают возможность получить необходимую производительность были визуализированы ее значения при изменении варьируемых параметров (рисунки 4.4-4.9)

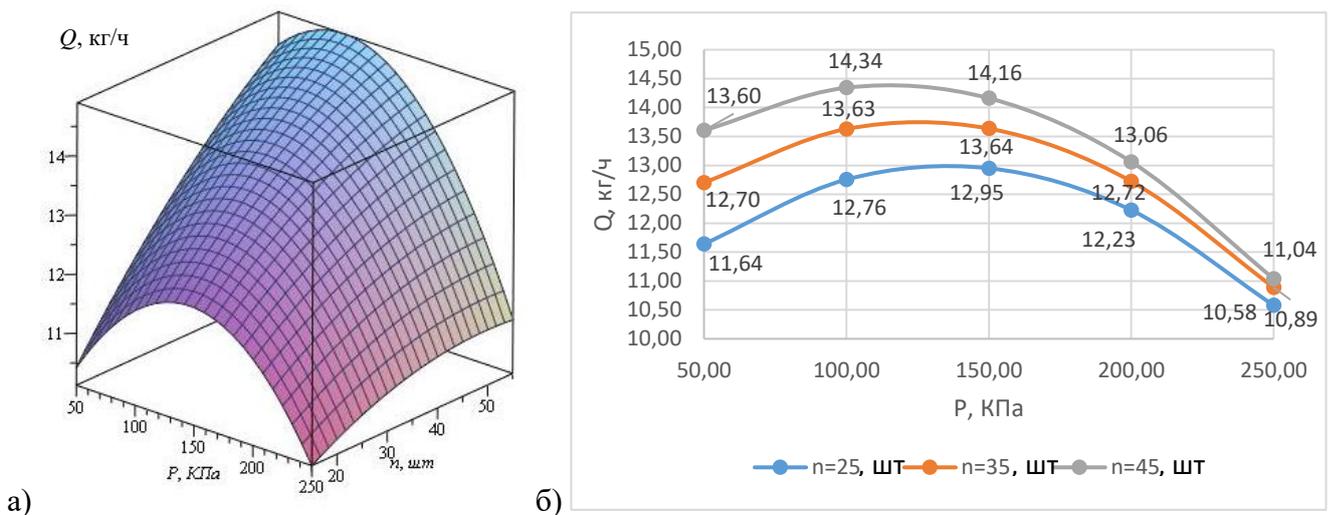


Рисунок 4.4 Графики зависимости производительности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $Q = f(p, n)$ при $\psi = 70\%$ и $H = 30$ мм;
 б – график зависимости $Q = f(p, n)$ при $\psi = 70\%$ и $H = 30$ мм

Графики зависимости $Q = f(p, n)$ (рисунок 4.4, а и б) носят параболический характер при фиксированных значениях $\psi = 70\%$, $H = 30$ мм и всех значений количества отверстий на спиральной трубке n производительность:

- максимальная при $p \approx 125-150$ КПа и равна 12,8 кг/ч при $n = 25$ шт, 13,6 кг/ч при $n = 35$ шт, 14,3 кг/ч при $n = 45$ шт;

- минимальная при $p = 250$ КПа и равна 10,6 кг/ч при $n = 25$ шт, 10,9 кг/ч при $n = 35$ шт, 11 кг/ч при $n = 45$ шт;

- имеет промежуточное значение при $p = 50$ КПа и равна 11,6 кг/ч при $n = 25$ шт, 12,7 кг/ч при $n = 35$ шт, 13,6 кг/ч при $n = 45$ шт.

При этом отметим, что при $p = 50$ КПа производительность для всех n больше на 1,1...1,2, чем при $p = 250$ КПа. Это происходит потому, что при увеличении давления в смесительной камере начинает накапливаться избыточное давление, что затрудняет выход материала из смесителя, а следовательно, и снижает его производительность.

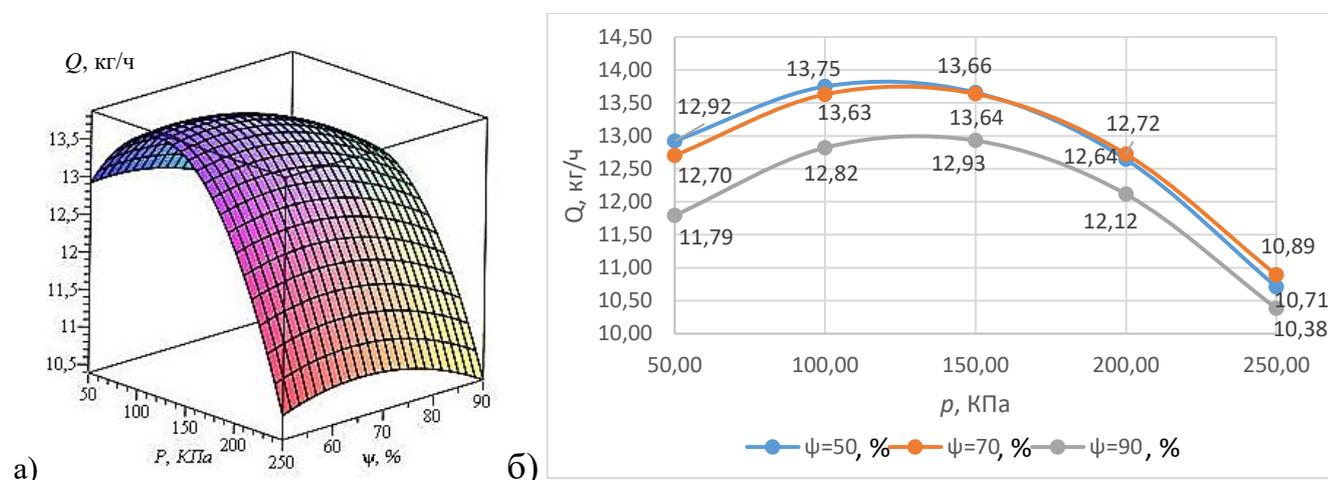


Рисунок 4.5 Графики зависимости производительности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $Q = f(p, \psi)$ при $n = 35$ шт и $H = 30$ мм;
 б – график зависимости $Q = f(p, \psi)$ при $n = 35$ шт и $H = 30$ мм

Графики зависимости $Q = f(p, \psi)$ (рисунок 4.5, а и б) носят параболический характер для фиксированных значений $n = 35$ шт, $H = 30$ мм и всех значений загрузки материала ψ производительность:

- максимальная при $p \approx 125-150$ КПа и равна 12,8 кг/ч при $\psi = 90\%$, 13,6 кг/ч при $\psi = 70\%$, 13,7 кг/ч при $\psi = 50\%$;

- минимальная при $p = 250$ КПа и равна 10,4 кг/ч при $\psi = 90\%$, 10,7 кг/ч при $\psi = 50$ шт, 10,9 кг/ч при $\psi = 70\%$;

- имеем промежуточное значение при $p = 50$ КПа и равна 11,8 кг/ч при $\psi = 90\%$, 12,7 кг/ч при $\psi = 70\%$, 12,9 кг/ч при $\psi = 50\%$.

Это происходит потому, что при увеличении давления в смесительной камере начинает накапливаться избыточное давление, что затрудняет выход материала из

смесителя и ведет к снижению его производительности, а при увеличении загрузки материала движение становится еще более затруднено. Отметим, что при загрузке материала в интервале $\psi = 50-70\%$ производительность смесителя практически не изменяется и соответствует максимальным значениям. Исходя из экономической целесообразности рекомендуется загрузка материала равная 70%.

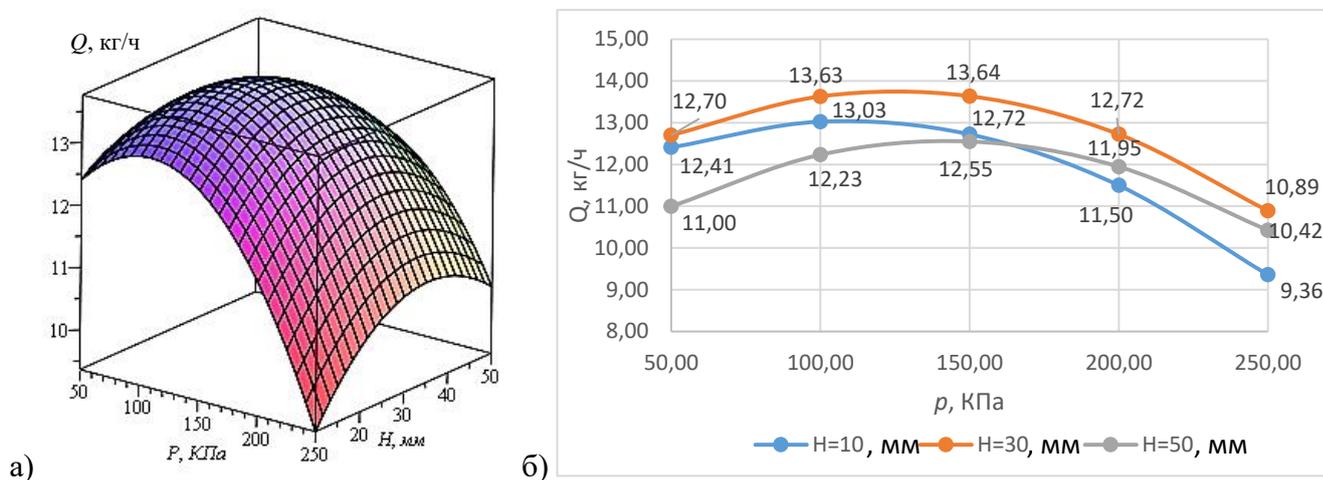


Рисунок 4.6 Графики зависимости производительности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $Q = f(p, H)$ при $n = 35$ шт и $\psi = 70\%$;
 б – график зависимости $Q = f(p, H)$ при $n = 35$ шт и $\psi = 70\%$

Графики зависимости $Q = f(p, H)$ (рисунок 4.6, а и б) носят параболический характер для фиксированных значений $n = 35$ шт., $\psi = 70\%$ и всех значений шага спирали H производительность:

- максимальная при $p = 150$ КПа и равна 12,55 кг/ч при $H = 50$ мм и 13,64 кг/ч при $H = 30$ мм, а значение при $H = 10$ мм равное 13,03 кг/ч максимально при $p = 100$ КПа и отличается от остальных максимальных значений с другим шагом спирали незначительно;

- минимальная при $p = 250$ КПа и равна 9,36 кг/ч при $H = 10$ мм, 10,4 кг/ч при $H = 50$ мм, 10,9 кг/ч при $H = 30$ мм;

- промежуточное значение при $p = 50$ КПа и равна 11 кг/ч при $H = 50$ мм, 12,4 кг/ч при $H = 10$ мм, 12,7 кг/ч при $H = 30$ мм.

Производительность при любом шаге спирали на интервале $p = 50-150$ КПа изменяется незначительно. При увеличении давления в смесительной камере начинает накапливаться избыточное давление, что затрудняет выход материала из смесителя и ведет к снижению его производительности. Так как отверстия на

спиральной трубке расположены равномерно, то при увеличении шага спирали воздействие на материал будет происходить не в одной зоне смесителя, а равномерно по всей камере, и как отмечено выше, при увеличении давления, подаваемого в спиральную трубку, движение материала по камере будет затруднено.

Анализ графических зависимостей (рисунки 4.3-4.6) показал, что максимальная производительность будет получена в интервале значений подаваемого давления 120-150 КПа, количества отверстий на спиральной трубке равным 45 шт., при загрузке материала 70% и шаге спирали 30 мм.

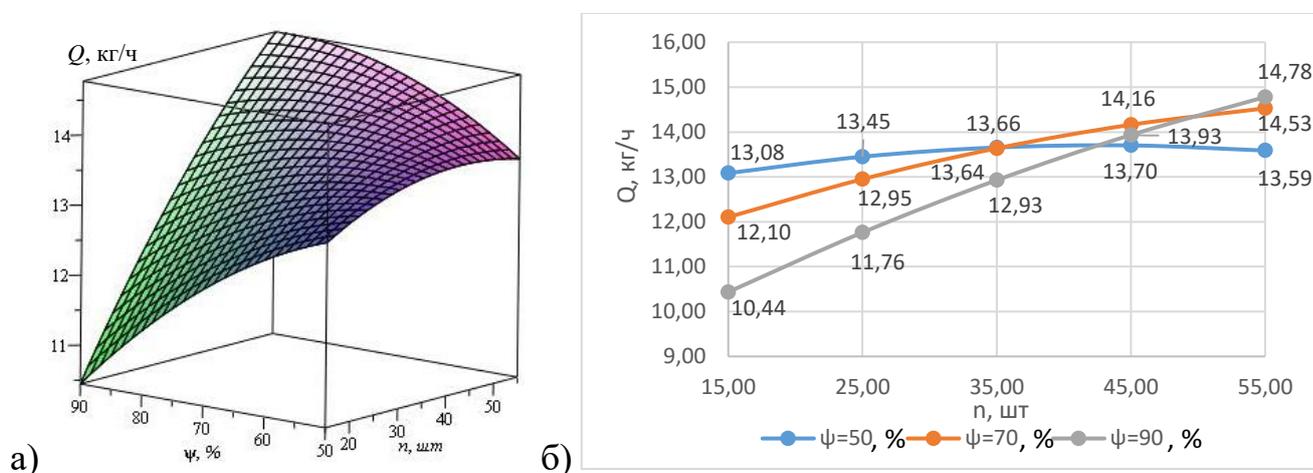


Рисунок 4.7 Графики зависимости производительности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $Q = f(n, \psi)$ при $p = 150$ КПа и $H = 30$ мм;
 б – график зависимости $Q = f(n, \psi)$ при $p = 150$ КПа и $H = 30$ мм

Графики зависимости $Q = f(n, \psi)$ (рисунок 4.7, а и б) носят возрастающий характер для фиксированных значений $p = 150$ КПа, $H = 30$ мм и всех значений загрузки материала ψ производительность:

- максимальная при $n = 55$ шт. и равна 14,5 кг/ч при $\psi = 70\%$, 14,7 кг/ч при $\psi = 90\%$, максимальное значение при $\psi = 50\%$ имеет при $n = 45$ шт., но это значение отличается от остальных максимальных значений незначительно;

- минимальная при $n = 15$ шт. и равна 10,4 кг/ч при $\psi = 90\%$, 12,1 кг/ч при $\psi = 70\%$, 13,08 кг/ч при $\psi = 50\%$.

При коэффициенте загрузке 50%, давлении $p = 150$ КПа и шаге спирали $p = 30$ мм в интервале изменения значений количества отверстий 15-55 шт. производительность изменяется незначительно (13,1; 13,5; 13,7; 13,7; 13,6 кг/ч),

потому что потоки подаваемого воздуха через отверстия на спиральной трубке относительно свободно перемещают материал по всему объёму камеры. Некоторое увеличение производительности (до 13,7 кг/ч) при 35 шт. и 45 шт. отверстий на спирали показывают стабилизацию траектории перемещения материала сжатым воздухом, а при увеличении количества отверстий до 55 шт. интенсифицируется воздушный поток и происходит хаотичное перемещение частиц материала, при этом они, сталкиваясь, гасят скорость друг друга.

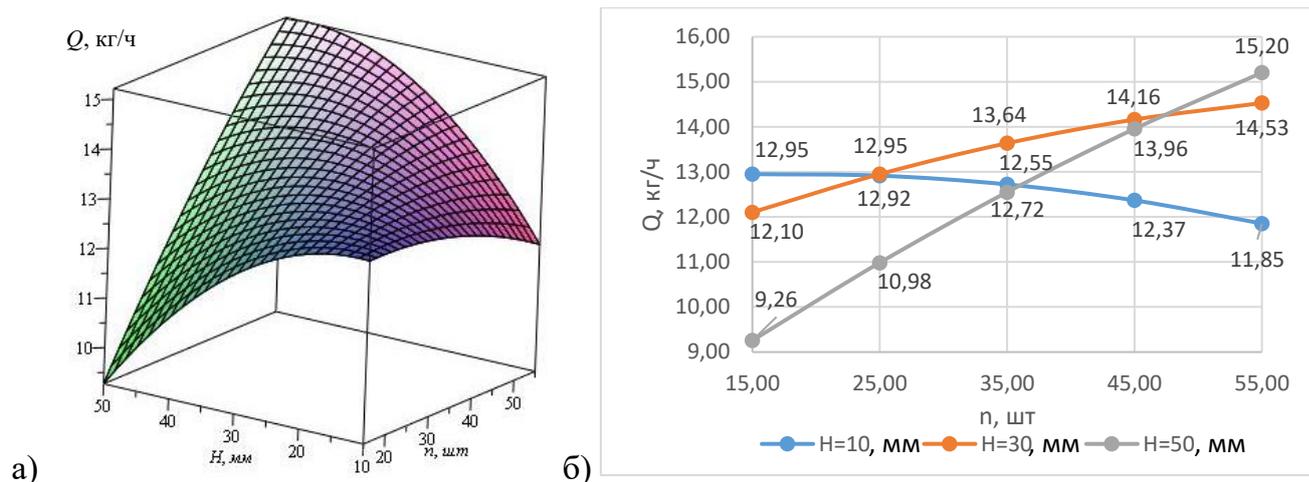


Рисунок 4.8 Графики зависимости производительности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $Q = f(n, H)$ при $p = 150$ КПа и $\psi = 70\%$;
 б – график зависимости $Q = f(n, H)$ при $p = 150$ КПа и $\psi = 70\%$

Графики зависимости $Q = f(n, H)$ (рисунок 4.8, а и б) носят возрастающий характер при фиксированных значений $p = 150$ КПа и $\psi = 70\%$ и указанном шаге спирали H производительность:

- максимальная при $n = 55$ шт. и равна 14,5 кг/ч при $H = 30$ мм, 15,2 кг/ч при $H = 50$ мм;

- минимальная при $n = 15$ шт. и равна 9,3 кг/ч при $H = 50$ мм, 12,1 кг/ч при $H = 30$ мм.

При шаге спирали $H = 10$ мм характер графика носит убывающий характер и производительность:

- максимальная при $n = 15$ шт. и равна 12,9 кг/ч при $H = 10$ мм;
- минимальная при $n = 55$ шт. и равна 11,9 кг/ч при $H = 10$ мм.

Увеличение количества отверстий на спиральной трубке и шага спирали повышает воздействие подаваемого сжатого воздуха из отверстий, расположенных

на спирали на компоненты смеси, тем самым будет увеличиваться и производительность, при увеличении шага спирали воздействие на материал будет происходить не в одной зоне смесителя, а равномерно по всей камере, что стабилизирует воздействие воздушного потока на поток подаваемого материала, что повышает производительность. Таким образом, наибольшую производительность равную 15,2 кг/ч получаем при количестве отверстий на спирали 55 шт. и шаге спирали равном 50 мм, при $p = 150$ КПа и $\psi = 70\%$.

Анализ графиков (рисунки 4.7, 4.8) показал, что максимальное значение производительности равное 12,5 кг/ч получено при количестве отверстий на спиральной трубке 55 шт., загрузке материала 90%, шаге спирали 50 мм.

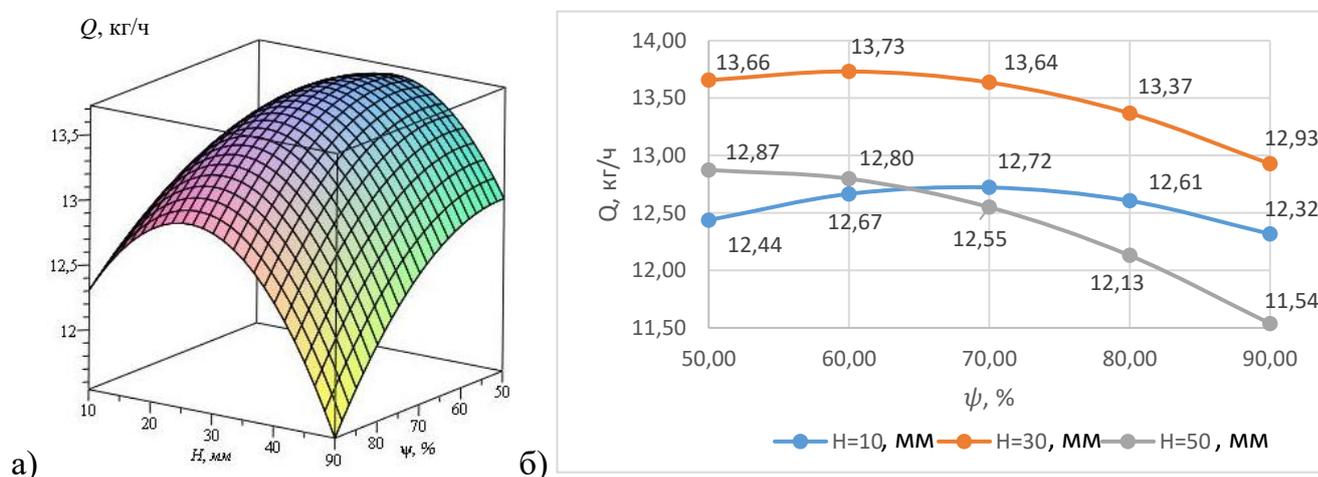


Рисунок 4.9 Графики зависимости производительности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $Q = f(\psi, H)$ при $p = 150$ КПа и $n = 35$ шт.;
 б – график зависимости $Q = f(\psi, H)$ при $p = 150$ КПа и $n = 35$ шт.

Графики зависимости $Q = f(\psi, H)$ (рисунок 4.9, а и б) имеют фиксированные значения $p = 150$ КПа и $n = 35$ шт. и носят параболический характер при шаге спирали $H = 10$ мм, 30 мм и убывающий характер для $H = 50$ мм. Для всех значений H производительность:

- максимальная 12,7 кг/ч при $\psi = 70\%$ и $H = 10$ мм, 13,7 кг/ч при $\psi = 60\%$ и $H = 30$ мм, 12,9 кг/ч при $\psi = 90\%$ и $H = 50$ мм;
- минимальная 12,3 кг/ч при $\psi = 90\%$ и $H = 10$ мм, 12,9 кг/ч при $\psi = 90\%$ и $H = 30$ мм, 11,5 кг/ч при $\psi = 90\%$ и $H = 50$ мм;

- промежуточные значения 12,4 кг/ч при $\psi = 50\%$ и $H = 10$ мм, 13,6 кг/ч при $\psi = 50\%$ и $H = 30$ мм.

Анализ полученных графиков показывает, что для получения максимальных значений производительности наиболее целесообразно при $p = 150$ КПа, $n = 35$ шт. коэффициент загрузки материалов варьировать в пределах 60-68 %.

Анализ изменения производительности в интервале давления от 50 до 250 КПа показал, что характер графиков – параболический, наибольшие значения производительности получены в районе 100-150 КПа, а минимальные при 250 КПа, промежуточные значения при давлении 50 КПа, причем примерно в 1.1-1.2 раза больше, чем при 250 КПа:

- при $\psi = 70\%$, $H = 30$ мм и $n = 25, 35, 45$ шт. наибольшая производительность 14,2-14,3 кг/ч при $n = 45$ шт., это происходит, потому что значимость этого фактора для производительности составляет 54%, при дальнейшем увеличении количества отверстий происходит накапливание избыточного давления, что снижает производительность примерно на 30%;

- при $n = 35$ шт., $H = 30$ мм и $\psi = 50, 70, 90\%$, наибольшая производительность 13,7-13,8 кг/ч при $\psi = 50$ и 70% соответственно, производительность смесителя практически не изменяется, исходя из экономической целесообразности рекомендуемая загрузка материала равна 70%;

- при $n = 35$ шт., $\psi = 70\%$ и $H = 10, 30, 50$ мм наибольшая производительность 13,6 кг/ч при $H = 30$ мм, она примерно больше в 1.1 раза, чем при $H = 10$ мм и $H = 50$ мм, это объясняется тем, что для производительности значимость этого фактора равна 1%.

Установлено, что, при фиксированном давлении равном 150 КПа максимальная экспериментальная производительность 15,2 кг/ч получена при наибольшей проходимости материала через витки спирали $H = 50$ мм и количества отверстий $n = 55$ шт., а также максимальном коэффициенте загрузки $\psi = 90\%$ (теоретический максимум функции производительности равен 16,3 кг/ч и получен при следующих значениях основных факторов $H = 50$ мм, $n = 55$ шт., $\psi = 90\%$).

4.3 Анализ зависимости коэффициента неоднородности готовой смеси от основных параметров пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой

На основании полученных значений после проведения лабораторных экспериментов (таблица 4.2) получено уравнение регрессии коэффициента неоднородности в кодированном виде:

$$Vc = 3,1 - 1,12 \cdot x_1 - 1,77 \cdot x_2 + 0,28 \cdot x_3 - 1 \cdot x_4 + 1,31 \cdot x_1^2 + 0,84 \cdot x_2^2 + 0,22 \cdot x_3^2 + 0,19 \cdot x_4^2 - 0,04 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,43 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,3 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,44 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,93 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,43 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (4.7)$$

В натуральном виде получим уравнение:

$$Vc = 49,6 - 0,135 \cdot p - 0,72 \cdot n - 0,125 \cdot \psi - 0,93 \cdot H + 0,00052 \cdot p^2 + 0,0084 \cdot n^2 + 0,0022 \cdot \psi^2 + 0,0019 \cdot H^2 - 0,00008 \cdot p \cdot n - 0,00086 \cdot p \cdot \psi + 0,0006 \cdot p \cdot H - 0,0044 \cdot n \cdot \psi + 0,0093 \cdot n \cdot H + 0,0043 \cdot \psi \cdot H. \quad (4.8)$$

При определении наибольшего значения функции отклика коэффициента неоднородности в области варьирования параметров: $p = 50-250$ КПа, $n = 15-45$ шт., $\psi = 50-90\%$, $H = 10-50$ мм получили следующие максимальные и минимальные значения экстремума функций:

- $Vc_{\max} = 26,6\%$, $H = 10$ мм, $n = 15$ шт., $p = 250$ КПа, $\psi = 50\%$;
- $Vc_{\min} = 0,7\%$, $H = 50$ мм, $n = 55$ шт., $p = 50$ КПа, $\psi = 90\%$.

Проверка адекватности регрессионного уравнения проводится по критерию Фишера, условие (4.4) выполняется:

$$3,08 \leq 4,06.$$

Следовательно, уравнение регрессии адекватно.

Оценка значимости факторов (4.5) по критерию Стьюдента (t_p), определило, что все коэффициенты значимы:

$$3,1 > 0,01 \cdot 2,45; 1,12 > 0,003 \cdot 2,45; 1,7 > 0,003 \cdot 2,45; 0,2 > 0,003 \cdot 2,45; 0,9 > > 0,004 \cdot 2,45; 0,04 > 0,004 \cdot 2,45; 0,4 > 0,004 \cdot 2,45; 0,29 > 0,004 \cdot 2,45; 0,44 > > 0,004 \cdot 2,45; 0,9 > 0,004 \cdot 2,45; 0,34 > 0,003 \cdot 2,45; 1,31 > 0,003 \cdot 2,45; 0,84 > > 0,003 \cdot 2,45; 0,21 > 0,003 \cdot 2,45.$$

Однородность оценок дисперсий по критерию Кохрена (4.6) показали, что опыты воспроизводимы:

$$0,06 < 0,15.$$

Анализ уравнения регрессии (4.7) коэффициента неоднородности смеси (V_c), где коэффициент загрузки x_3 (ψ) имеет положительное (+) значение, поэтому при увеличении этого фактора происходит увеличение значения неоднородности смеси.

Факторы (давление, подаваемое в спиральную трубку x_1 (p), количество отверстий на спиральной трубке x_2 (n) и шаг спирали x_4 (H)) имеют отрицательные значения (-), поэтому снижают значение коэффициента неоднородности при их увеличении. При увеличении подаваемого давления и количества отверстий на спиральной трубке происходит интенсификация процесса смешивания и тем самым уменьшается коэффициент неоднородности, а так как отверстия на спиральной трубке расположены равномерно, то при увеличении шага спирали x_4 (H) воздействие на материал будет происходить не в одной зоне смесителя, а равномерно по всей камере, что тем самым также снижает коэффициент неоднородности.

Была определена значимость факторов (3.11) для коэффициента неоднородности пневматического смесителя (рисунок 4.10), которая показала, что наибольшее влияние оказывает значение шаг спирали и коэффициент загрузки равные 59% и 24% соответственно.

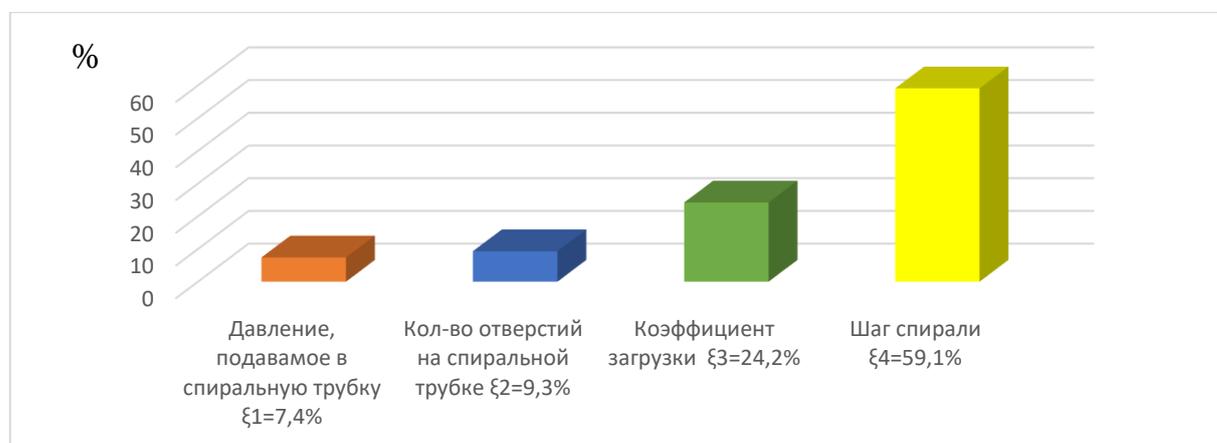


Рисунок 4.10 Диаграмма значимости факторов для коэффициента неоднородности

Выделенный на графиках (рисунки 4.11-4.16) диапазон значений коэффициента неоднородности равный 1-5% характеризует повышение эффективности процесса смешивания и качественные показатели готовой смеси.

Для определения рациональных параметров пневматического смесителя, которые дают возможность получить требуемый коэффициент неоднородности, были визуализированы ее значения при изменении варьируемых параметров (рисунки 4.11-4.16).

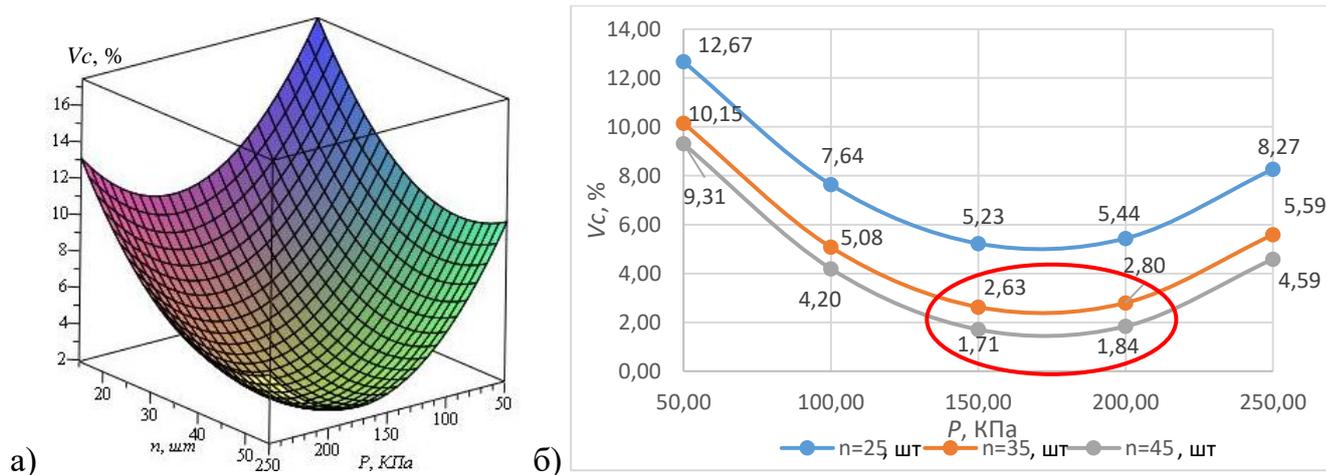


Рисунок 4.11 Графики зависимости коэффициента неоднородности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $V_c = f(p, n)$ при $\psi = 70\%$ и $H = 30$ мм;
 б – график зависимости $V_c = f(p, n)$ при $\psi = 70\%$ и $H = 30$ мм

Графики зависимости $V_c = f(p, n)$ (рисунок 4.11, а и б) носят параболический характер для фиксированных значений $\psi = 70\%$, $H = 30$ мм и для всех значений количества отверстий на спиральной трубке n коэффициент неоднородности:

- минимальный при $p = 150$ КПа и равен 5,23% при $n = 25$ шт., 2,63% при $n = 35$ шт., 1,71% при $n = 45$ шт.;
- максимальный при $p = 50$ КПа и равен 12,7% при $n = 25$ шт., 10,2% при $n = 35$ шт., 9,3 % при $n = 45$ шт.;
- имеем промежуточное значение коэффициента при $p = 250$ КПа и равен 8,3% при $n = 25$ шт., 5,6% при $n = 35$ шт., 4,6% при $n = 45$ шт.

При увеличении давления и количества отверстий на спиральной трубке происходит интенсификация процесса за счет воздействия сжатого воздуха, исходящего из отверстий на спиральной трубке на смешиваемый материал, а следовательно, коэффициент неоднородности будет снижаться.

Минимальное значение коэффициента неоднородности от 1,7 до 2,8% получаем при интервале варьирования давления от 150 до 200 КПа, $\psi = 70\%$ и $H = 30$ мм для количества отверстий 35 шт. и 45 шт.

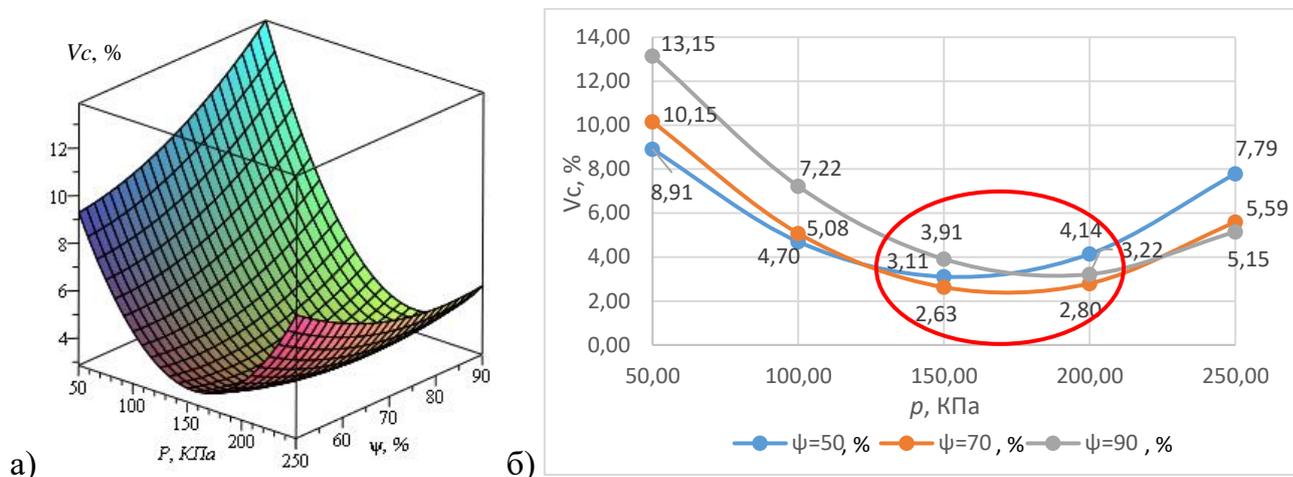


Рисунок 4.12 График зависимости коэффициента неоднородности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $V_c = f(p, \psi)$ при $n = 35$ шт. и $H = 30$ мм;
 б – график зависимости $V_c = f(p, \psi)$ при $n = 35$ шт. и $H = 30$ мм

Графики зависимости $V_c = f(p, \psi)$ (рисунок 4.12, а и б) носят параболический характер для фиксированных значений $n = 35$ шт., $H = 30$ мм и для всех значений загрузки материала ψ коэффициент неоднородности:

- минимальная при $p = 150$ КПа и равен 3,9% при $\psi = 90\%$, 3,1% при $\psi = 70\%$, 2,6% при $\psi = 50\%$;

- максимальная при $p = 50$ КПа и равен 13,1 при $\psi = 90\%$, 8,1% при $\psi = 50$ шт., 10,1% при $\psi = 70\%$;

- промежуточное значение находится при $p = 250$ КПа и равна 5,2% при $\psi = 90\%$, 5,6% при $\psi = 70\%$, 7,8% при $\psi = 50\%$.

Воздействие на смешиваемый материал давления в 50-100 КПа недостаточно и процесс смешивания происходит неинтенсивно, при дальнейшем увеличении давления:

- при $\psi = 50\%$ скорость движения компонентов смеси увеличивается, тем самым они быстрее начинают покидать камеру смешивания, не успев достаточно перемешаться (7,8-8,1%);

- при $\psi = 90\%$ движение компонентов смеси становится затруднено за счет высоких скоростей движения частиц и максимальной загрузки камеры смешивания материалом, так как при соударении частиц между собой скорость перемещения снижается (5,2-13,1%).

Минимальное значение коэффициента неоднородности от 2,6 до 4,1% получаем при интервале варьирования давления 150-200 КПа для всего интервала варьирования коэффициента загрузки при $n = 35$ шт и $H = 30$ мм.

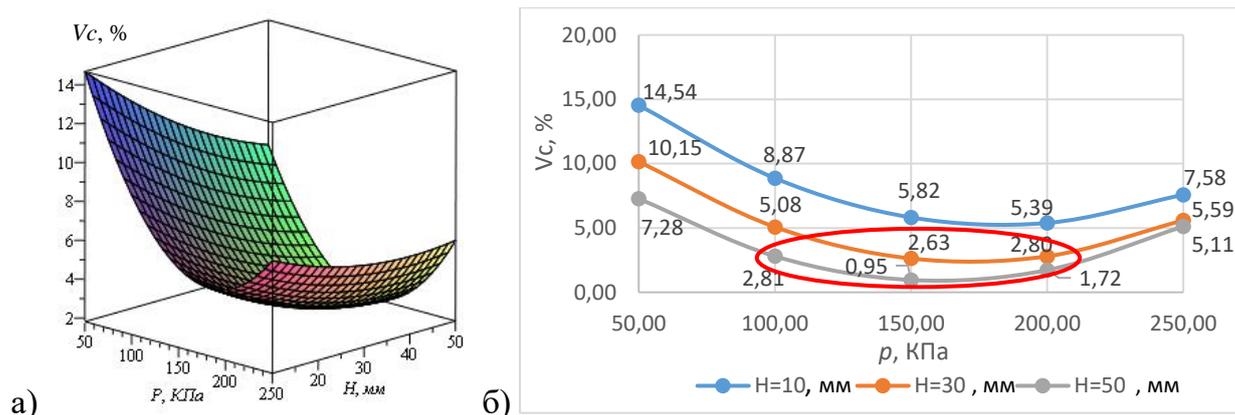


Рисунок 4.13 График зависимости коэффициента неоднородности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $V_c = f(p, H)$ при $n = 35$ шт. и $\psi = 70\%$;
 б – график зависимости $V_c = f(p, H)$ при $n = 35$ шт. и $\psi = 70\%$

Графики зависимости $V_c = f(p, H)$ (рисунок 4.13, а и б) носят параболический характер для фиксированных значений $n = 35$ шт., $\psi = 70\%$ и для всех значений шага спирали H коэффициент неоднородности:

- минимальный при $p = 150$ КПа и равен 1% при $H = 50$ мм и 2,6% при $H = 30$ мм, при $H = 10$ мм равен 5,8%;

- максимальный при $p = 50$ КПа и равен 14,5% при $H = 10$ мм, 7,2% при $H = 50$ мм, 10,1% при $H = 30$ мм;

- промежуточное значение при $p = 250$ КПа и равен 5,11% при $H = 50$ мм, 7,6% при $H = 10$ мм, 5,6 при $H = 30$ мм.

Так как отверстия на спиральной трубке расположены равномерно, то при увеличении шага спирали воздействие на материал будет происходить не в одной зоне смесителя, а равномерно по всей камере, тем самым увеличивая воздействие сжатого воздуха на смешиваемый материал, и как отмечено ранее, при увеличении давления, подаваемого в спиральную энергонесущую трубку,

движение материала по камере будет затруднено за счет избыточного давления. Рациональные значения сжатого воздуха находятся в интервале 100-200 КПа, при меньшем давлении его воздействие на смешиваемый поток будет недостаточно и не позволит получить требуемый коэффициент неоднородности, при значении большем чем интервальные, скорость движения компонентов смеси увеличивается, и они быстрее начинают покидать камеру смешивания, при этом качество смеси будет снижаться. Минимальные значения коэффициента неоднородности от 1 до 2,8% получаем при интервале варьирования давления 100-200 КПа для шага спирали $H = 30$ мм и 50 мм и при $n = 35$ шт. и $\psi = 70\%$.

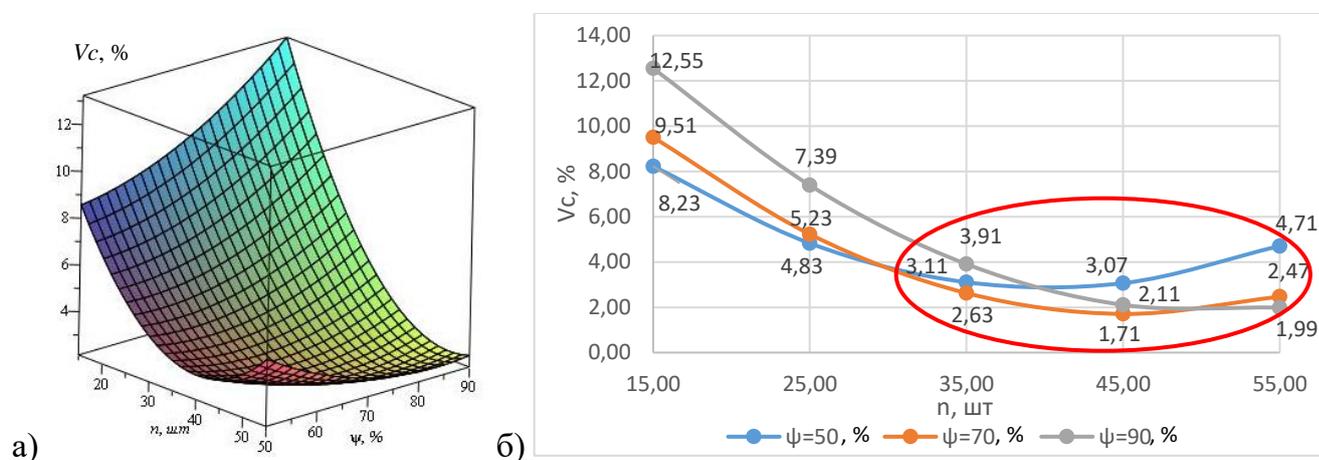


Рисунок 4.14 График зависимости коэффициента неоднородности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $V_c = f(n, \psi)$ при $p = 150$ КПа и $H = 30$ мм;
 б – график зависимости $V_c = f(n, \psi)$ при $p = 150$ КПа и $H = 30$ мм

Графики зависимости $V_c = f(n, \psi)$ (рисунок 4.14, а и б) носят параболический характер для фиксированных значений $p = 150$ КПа, $H = 30$ мм и значений загрузки материала $\psi = 50$ и 70% , а убывающий характер при $\psi = 90\%$. Для указанных значений ψ коэффициент неоднородности:

- минимальный при $n = 45$ шт. и равен 1,7 при $\psi = 70\%$, 3,07 при $\psi = 50\%$ и при $\psi = 90\%$ имеет минимальное значение при $n = 55$ шт. и равен 2%;
- максимальный при $n = 15$ шт. и равен 12,6% при $\psi = 90\%$, 9,5% при $\psi = 70\%$, 8,2% при $\psi = 50\%$.

При загрузке материала ($\psi = 50, 70, 90\%$) увеличение количества отверстий (35-55 шт.) на спиральной трубке влечет за собой увеличение воздействия воздушного потока на смешиваемый материал, обеспечивая минимальные

значения коэффициента неоднородности от 1,7 до 4,7%, которые получаем при $p = 150$ КПа и $H = 30$ мм.

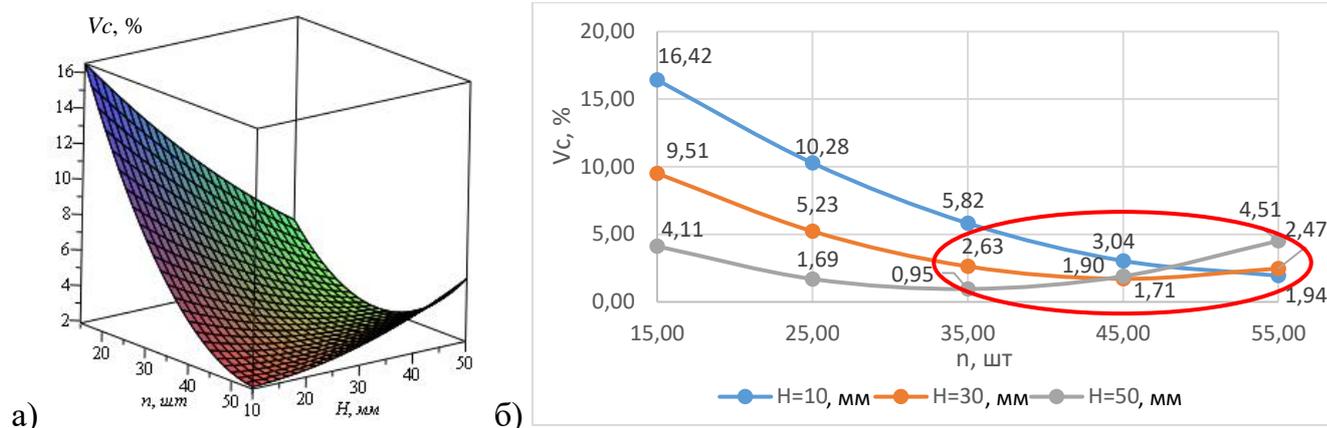


Рисунок 4.15 График зависимости коэффициента неоднородности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $Vc = f(n, H)$ при $p = 150$ КПа и $\psi = 70\%$;
 б – график зависимости $Vc = f(n, H)$ при $p = 150$ КПа и $\psi = 70\%$

Графики зависимости $Vc = f(n, H)$ (рисунок 4.15, а и б) носит параболический характер при фиксированных значениях $p = 150$ КПа, $\psi = 70\%$ и для указанных значений шага спирали $H = 30$ и 50 мм коэффициент неоднородности:

- минимальный при $n = 45$ шт. и равен 1,9% при $H = 30$ мм, 1,9% при $H = 50$ мм;
- максимальный при $n = 15$ шт. и равен 4,1% при $H = 50$ мм, 9,5% при $H = 30$ мм.

При фиксированном шаге спирали $H = 10$ мм характер графика носит убывающий характер и для указанных значений H производительности:

- максимальный при $n = 15$ шт. и равна 16,4% при $H = 10$ мм;
- минимальный при $n = 55$ шт. и равна 1,94% при $H = 10$ мм.

При шаге спирали ($H = 10, 30, 50$ мм) повышение количества отверстий (35-55 шт.) на спиральной трубке влечет за собой повышение воздействия воздушного потока на смешиваемый материал, обеспечивая минимальные значения коэффициента неоднородности от 1 до 4,5%, которые получаем при $p = 150$ КПа и $\psi = 70\%$.

Графики зависимости $V_c = f(\psi, H)$ (рисунок 4.16, а и б) имеют возрастающий характер при фиксированных значениях $p = 150$ КПа, $n = 35$ шт. и шаге спирали $H = 30$ мм, 50 мм и убывающий характер для $H = 10$ мм коэффициент неоднородности:

- максимальный 7,9% при $\psi = 50\%$ и $H = 10$ мм, 3,9% при $\psi = 90\%$ и $H = 30$ мм, 6,7% при $H = 50$ мм;

- минимальный 5,5% при $\psi = 90\%$ и $H = 10$ мм, 2,6% при $\psi = 70\%$ и $H = 30$ мм, 2,7 % при $\psi = 50\%$ и $H = 50$ мм;

- промежуточные значения 7,9% при $\psi = 50\%$ и $H = 10$ мм, 3,1% при $\psi = 50\%$ и $H = 30$ мм.

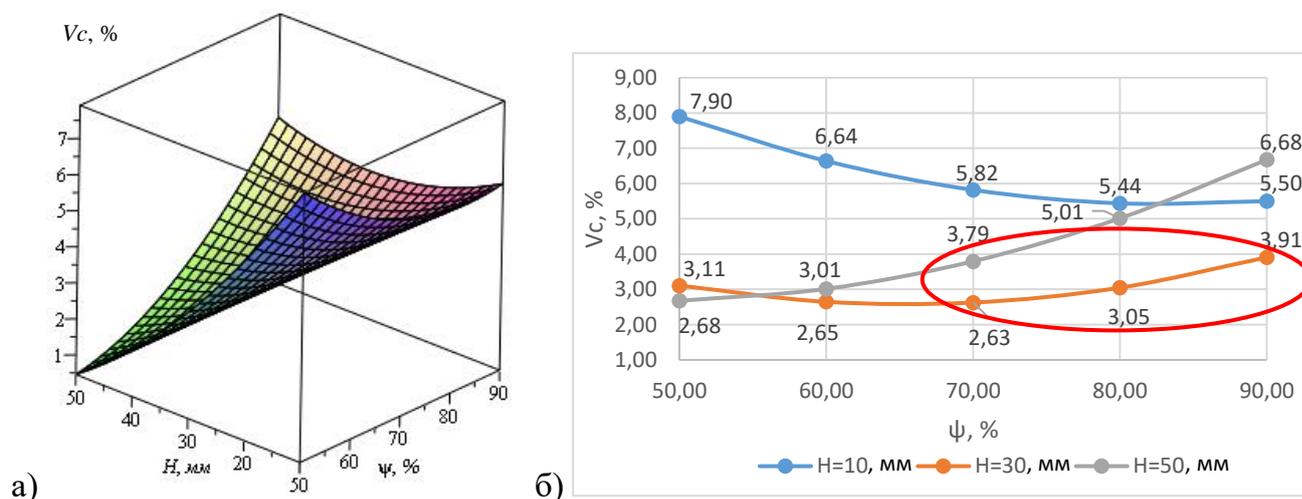


Рисунок 4.16 График зависимости коэффициента неоднородности смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $V_c = f(\psi, H)$ при $p = 150$ КПа и $n = 35$ шт.;
 б – график зависимости $V_c = f(\psi, H)$ при $p = 150$ КПа и $n = 35$ шт

Анализ изменения коэффициента неоднородности при изменении давления от 50 до 250 КПа показал, что характер графиков – параболический, желаемый диапазон значений коэффициента неоднородности (1-5%) получен в районе 150-200 КПа, а максимальные при 50 КПа, промежуточные значения при давлении 250 КПа:

- при $\psi = 70\%$, $H = 30$ мм и $n = 25, 35, 45$ шт. коэффициент неоднородности 1,71-2,8 % при $n = 35$ и $n = 45$ шт., это происходит из-за интенсификации процесса смешивания за счет воздействия сжатого воздуха, исходящего из отверстий на спиральной трубке на смешиваемый материал;

- при $n = 35$ шт., $H = 30$ мм и $\psi = 50, 70, 90\%$, коэффициент неоднородности 2,6-4,1% при всех значениях ψ , что можно объяснить тем, что при указанных геометрических параметрах происходит равномерное прохождение материала через витки спирали, а в указанном интервале давления не происходит возникновения хаотического перемещения частиц, которое при их соударении снижает скорость, тем самым повышая значения коэффициента неоднородности;

- при $n = 35$ шт., $\psi = 70\%$ и $H = 10, 30, 50$ мм, коэффициент неоднородности равен диапазону 1-2,8% при $H = 30$ мм и $H = 50$ мм, это можно объяснить тем, что значимость фактора шага спирали равна около 60%.

Установлено, что, наиболее целесообразно использовать давление равное 150 КПа при $n = 35, 45, 55$ шт. коэффициент неоднородности изменяется в пределах 1-4,7% при всех значениях шага спирали и для всех значений коэффициента загрузки, так как они имеют наибольшую значимость 60 и 24 %, соответственно, при этом увеличение количества отверстий на спирали от 35 до 55 шт. ведет к интенсификации процесса смешивания.

4.4 Анализ зависимости предела прочности готового продукта на сжатие от основных параметров пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой

На основании полученных значений после проведения экспериментов (таблица 4.2) получено уравнение регрессии предела прочности в кодированном виде:

$$\sigma_{сж} = 3,01 - 0,3 \cdot x_1 - 0,104 \cdot x_2 + 0,03 \cdot x_3 - 0,27 \cdot x_4 + 0,0062 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,068 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,15 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,106 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,143 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,068 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0,28 \cdot x_1^2 + 0,27 \cdot x_2^2 + 0,12 \cdot x_3^2 + 0,08 \cdot x_4^2. \quad (4.9)$$

В натуральном виде получим уравнение:

$$\sigma_{сж} = 17,6 - 0,04 \cdot p - 0,17 \cdot n - 0,127 \cdot \psi - 0,21 \cdot H + 0,00011 \cdot p^2 + 0,0027 \cdot n^2 + 0,0012 \cdot \psi^2 + 0,0008 \cdot H^2 + 0,000012 \cdot p \cdot n - 0,00013 \cdot p \cdot \psi + 0,0003 \cdot p \cdot H - 0,001 \cdot n \cdot \psi + 0,0014 \cdot n \cdot H + 0,0006 \cdot \psi \cdot H. \quad (4.10)$$

По стандарту [130, 131, 136] предел прочности на сжатие исследуемых образцов должен входить в интервал 1,5-5 МПа. Были определены теоретические экстремумы функции предела прочности при сжатии при варьировании основных факторов: $p = 50-250$ КПа, $n = 15-45$ шт., $\psi = 50-90\%$, $H = 10-50$ мм, при этом получили следующие значения:

$$- \sigma_{сж\ max} = 9,11 \text{ МПа}, H = 10 \text{ мм}, n = 15 \text{ шт.}, p = 50 \text{ КПа}, \psi = 90\%;$$

$$- \sigma_{сж\ min} = 1 \text{ МПа}, H = 50 \text{ мм}, n = 33 \text{ шт.}, p = 149 \text{ КПа}, \psi = 62\%.$$

Проверка адекватности регрессионного уравнения проводится по критерию Фишера, условие (4.4) выполняется:

$$3,8 \leq 4,06.$$

Следовательно, уравнение регрессии адекватно.

Оценка значимости факторов (4.5) по критерию Стьюдента (t_p) определила, что все коэффициенты значимы:

$$3,01 > 0,004 \cdot 2,45; 0,3 > 0,0012 \cdot 2,45; 0,1 > 0,0012 \cdot 2,45; 0,03 > 0,0012 \cdot 2,45; \\ 0,2 > 0,0012 \cdot 2,45; 0,006 > 0,0016 \cdot 2,45; > 0,0016 \cdot 2,45; 0,15 > 0,0016 \cdot 2,45; \\ 0,1 > 0,0016 \cdot 2,45; 0,14 > 0,0016 \cdot 2,45; 0,06 > 0,001 \cdot 2,45; 0,2 > 0,001 \cdot 2,45; \\ 0,2 > 0,001 \cdot 2,45; 0,21 > 0,001 \cdot 2,45.$$

Однородность оценок дисперсий по критерию Кохрена (4.6) показала, что воспроизводимы:

$$0,14 < 0,15.$$

Анализ уравнения регрессии (4.9) предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, показал, что коэффициент загрузки x_3 (ψ) имеет положительное (+) значение и при его увеличении происходит увеличение значения предела прочности на сжатии.

Факторы (давление, подаваемое в спиральную трубку x_1 (p), количество отверстий на спиральной трубке x_2 (n) и шаг спирали x_4 (H) имеют отрицательные значения (-), поэтому они снижают значение предела прочности при увеличении значений этих факторов. При увеличении подаваемого давления и количества отверстий на спиральной трубке происходит интенсификация процесса смешивания и тем самым положительно влияет на смешивание компонентов, а

так как отверстия на спиральной трубке расположены равномерно, то при увеличении шага спирали x_4 (H) воздействие на материал будет происходить не в одной зоне смесителя, а равномерно по всей камере и это тоже положительно влияет на процесс.

Были определены значимость факторов (3.11) для предела прочности пневматического смесителя (рисунок 4.17), которая показала, что все факторы, влияющие на процесс смешивания, равнозначны и имеют значения: давление, подаваемое в спиральную трубку, равно 22%, количество отверстий на спиральной трубке равно 21%, коэффициент загрузки 34%, шаг спирали 23%, что говорит о правильности выбранных интервалов варьирования факторов для определения параметра, характеризующего качество готового продукта.

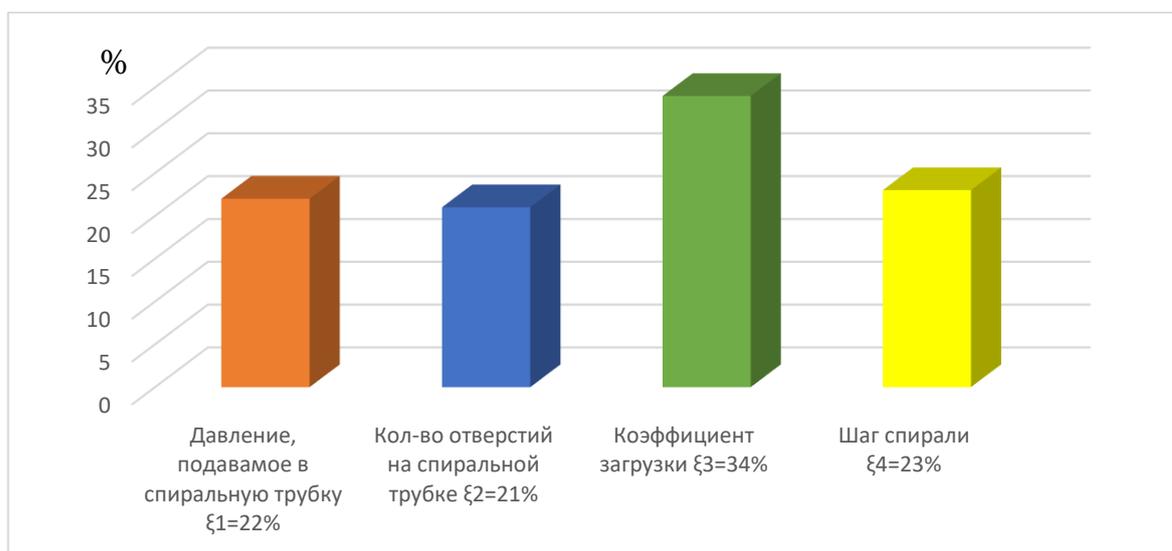


Рисунок 4.17 Диаграмма значимости факторов для предела прочности

Диапазон значений предела прочности при сжатии равный 1,5-5 МПа характеризует один из показателей качества готового изделия. Выделенный на графиках (рисунки 4.18-4.23) фрагмент показывает полученные значения предела прочности на сжатие, не входящие в указанный диапазон.

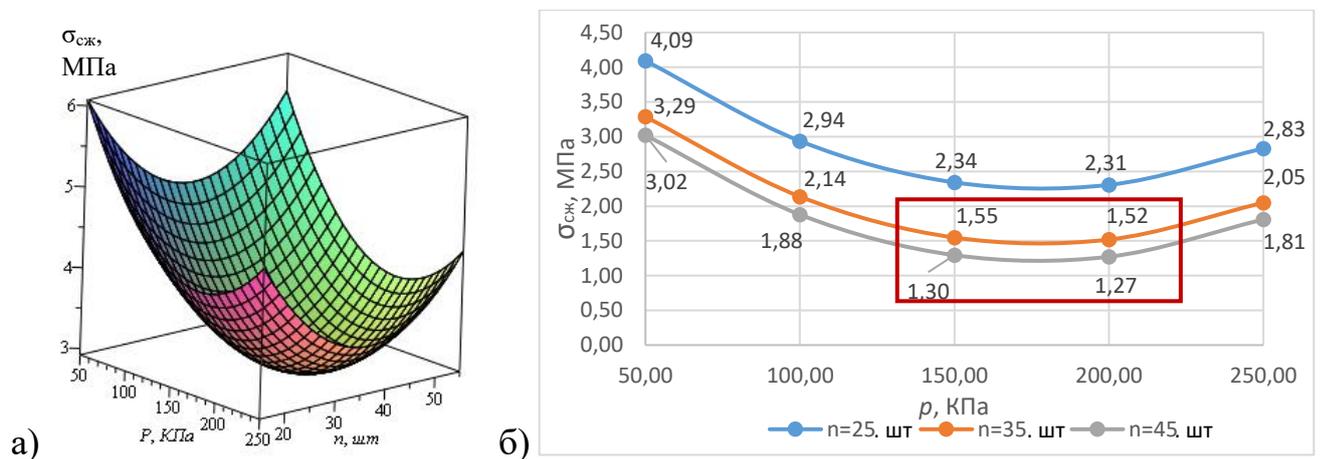


Рисунок 4.18 График зависимости предела прочности на сжатие смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $\sigma_{сж} = f(p, n)$ при $\psi = 70\%$ и $H = 30$ мм;
 б – график зависимости $\sigma_{сж} = f(p, n)$ при $\psi = 70\%$ и $H = 30$ мм

Графики зависимости $\sigma_{сж} = f(p, n)$ (рисунок 4.18, а и б) носят параболический характер для фиксированных значений $\psi = 70\%$ и $H = 30$ мм и для всех значений количества отверстий на спиральной трубке n допустимые значения предела прочности на сжатие получаем при:

- $n = 25$ шт. на всем интервале давления от 50 до 125 КПа и равны значениям от 2,3 до 4,1 МПа;
- $n = 35$ шт. и $n = 45$ шт. в интервале давления от 50 до 100 КПа и равны значениям от 1,8 до 3,3 МПа;
- $n = 35$ шт. и $n = 45$ шт. в интервале давления от 200 до 250 КПа и равны значениям от 1,8 до 2,05 МПа.

Из всего интервала допустимых значений выбираем за требуемые значения интервал 1,8-2,9 МПа при параметрах давления равным 150 КПа и всех значений количества отверстий, потому что этого давления достаточно, чтобы смешать компоненты и получить необходимые значения предела прочности при сжатии, при этом без перерасхода сжатого воздуха.

Графики зависимости $\sigma_{сж} = f(p, \psi)$ (рисунок 4.19, а и б) носят параболический характер для фиксированных значений $n = 35$ шт., $H = 30$ мм и для всех значений загрузки материала ψ допустимые значения предела прочности на сжатие получаем при:

- $\psi = 50\%$ и $\psi = 90\%$ на всем интервале изменения давления и равны значениям $\sigma_{сж}$ от 1,9 до 4,1 МПа;

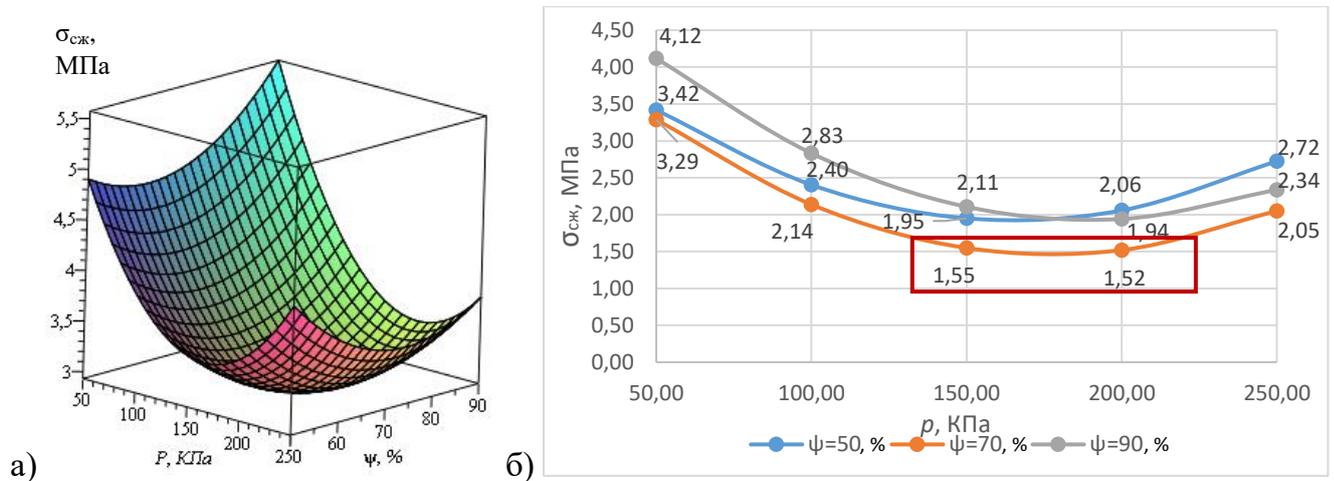


Рисунок 4.19 График зависимости предела прочности на сжатие смесителя:

а – 3-мерное изображение зависимости $\sigma_{сж} = f(p, \psi)$ при $n = 35$ шт. и $H = 30$ мм;

б – график зависимости $\sigma_{сж} = f(p, \psi)$ при $n = 35$ шт. и $H = 30$ мм

- $\psi = 70\%$ в интервале давления от 50 до 100 КПа и равны значениям $\sigma_{сж}$ от 2,1 до 3,3 МПа;

- $\psi = 70\%$ при давлении 250 КПа и равны значению $\sigma_{сж}$ 2,05 МПа.

Допустимые значения входят в интервал $\sigma_{сж}$ 2,1-2,8 МПа при всех значениях коэффициента загрузки и давлении от 50 до 100 КПа, что даст экономию сжатого воздуха.

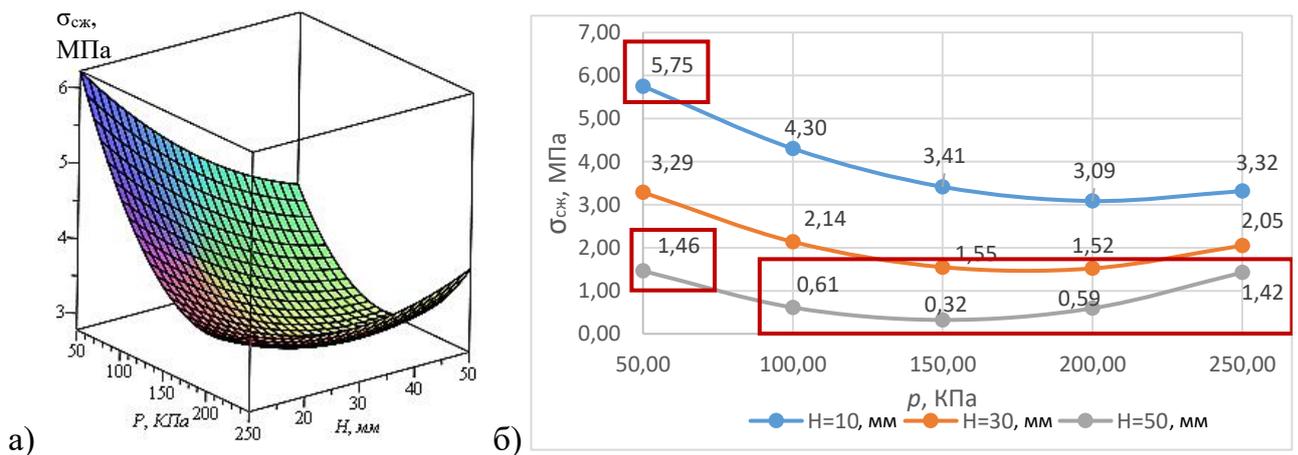


Рисунок 4.20 Графики зависимости предела прочности на сжатие смесителя:

а – 3-мерное изображение зависимости $\sigma_{сж} = f(p, H)$ при $n = 35$ шт. и $\psi = 70\%$;

б – график зависимости $\sigma_{сж} = f(p, H)$ при $n = 35$ шт. и $\psi = 70\%$

Графики зависимости $\sigma_{сж} = f(p, H)$ (рисунок 4.20, а и б) носят параболический характер для фиксированных значений $n = 35$ шт., $\psi = 70\%$ и для всех значений шага спирали H допустимые значения предела прочности на сжатие получаем при:

- $H = 10$ мм в интервале давления от 100 до 250 КПа и равняются интервалу 3,1-4,3 МПа;

- $H = 30$ мм в интервале давления от 50 до 150 КПа, а также 250 КПа и равны значениям от 2,1 до 3,3 МПа.

Допустимые значения входят в интервал $\delta_{сж}$ 2,1-4,3 МПа при параметрах давления равным 50-100 КПа и значений шага спирали $H = 10$ мм и $H = 30$ мм.

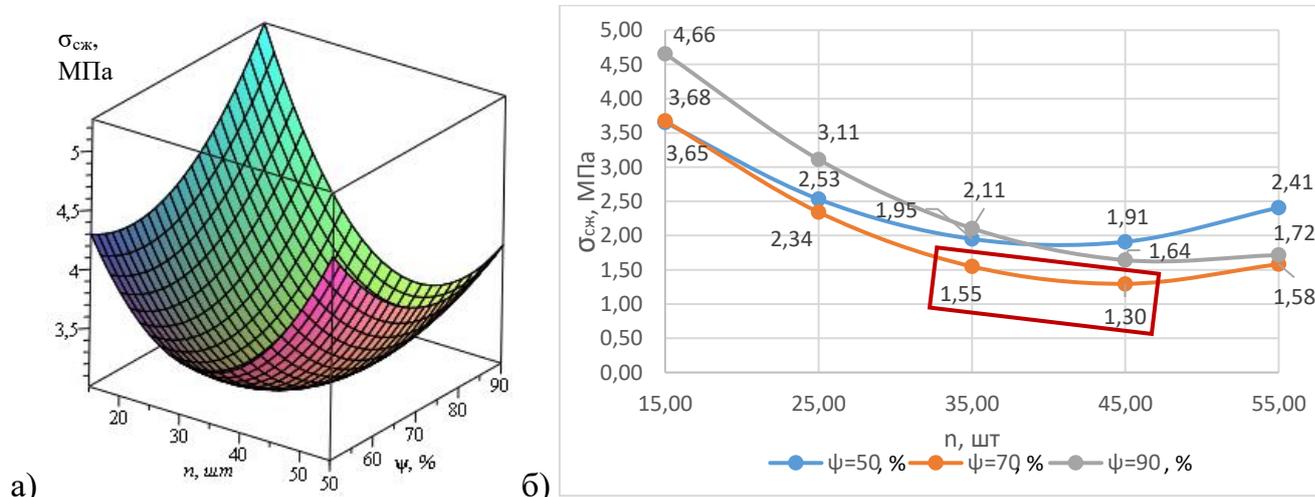


Рисунок 4.21 График зависимости предела прочности на сжатие смесителя:

а – 3-мерное изображение зависимости $\sigma_{сж} = f(n, \psi)$ при $p = 150$ КПа и $H = 30$ мм;

б - график зависимости $\sigma_{сж} = f(n, \psi)$ при $p = 150$ КПа и $H = 30$ мм

Графики зависимости $\sigma_{сж} = f(n, \psi)$ (рисунок 4.21, а и б) носят параболический характер для фиксированных значений $p = 150$ КПа, $H = 30$ мм и для всех значений загрузки материала ψ допустимые значения предела прочности на сжатие получаем при:

- $\psi = 50\%$ и $\psi = 90\%$ в интервале количества отверстий от 15 до 250 КПа и равняются интервалу 1,6-4,6 МПа;

- $\psi = 70\%$ в интервале давления от 50 до 100 КПа, а также 250 КПа и равны значениям $\sigma_{сж}$ от 1,58 до 3,6 МПа.

Допустимые значения входят в интервал $\sigma_{сж}$ от 2,3 до 3,1 МПа при $n = 25$ шт. для всех значений коэффициента загрузки, потому что такое количество отверстий достаточно для создания интенсивного смешивания. Выделенные значения предела прочности (рисунок 4.20, б) в интервале 1,3-1,5 МПа при количестве отверстий $n = 35-45$ шт. и $\psi = 70\%$ не соответствуют допустимым значениям.

Графики зависимости $\sigma_{сж} = f(n, H)$ (рисунок 4.22, а и б) носят параболический характер при фиксированных значениях $p = 150$ КПа, $\psi = 70\%$ и указанных значениях шага спирали H допустимые значения предела прочности на сжатие получаем при:

- $H = 10$ мм в интервале количества отверстий от 100 до 250 КПа и равняются интервалу 3,1-4,2 МПа;

- $H = 30$ мм в интервале давления от 50 до 100 КПа, а также 250 КПа и равны в интервале 1,5-3,6 МПа;

- $H = 50$ мм при давлении 50 КПа и равны значению 2,4 МПа.

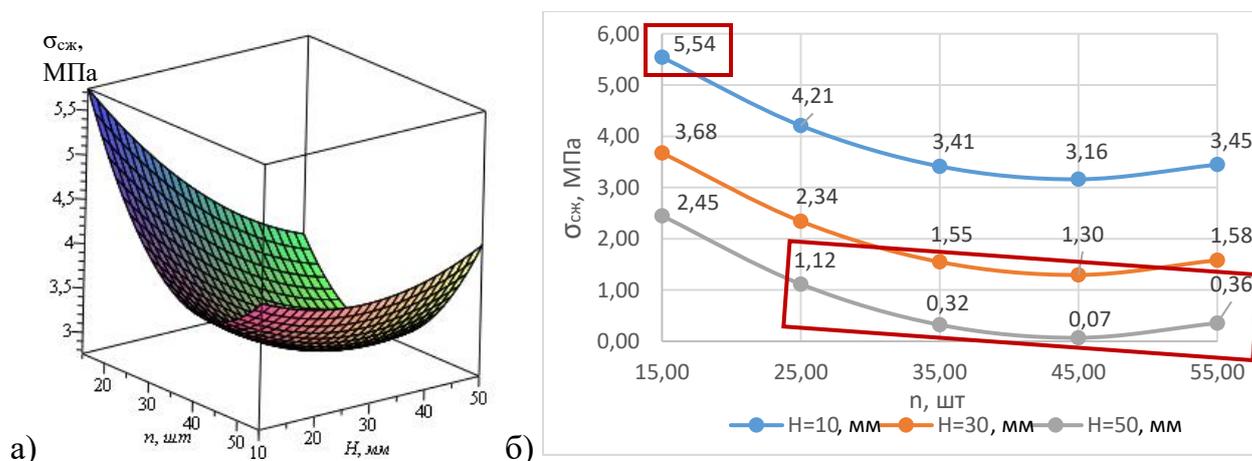


Рисунок 4.22 – График зависимости предела прочности на сжатие смесителя:
а – 3-мерное изображение зависимости $\sigma_{сж} = f(n, H)$ при $p = 150$ КПа и $\psi = 70\%$;
б – график зависимости $\sigma_{сж} = f(n, H)$ при $p = 150$ КПа и $\psi = 70\%$

Рациональные значения предела прочности на сжатие от 2,3 до 4,2 МПа получаем при $n = 15, 25$ шт., при шаге спирали $H = 10, 30, 50$ мм, потому что этого количества отверстий достаточно для интенсивного перемещения частиц и не происходит перерасхода воздуха, как это происходит при значительном увеличении количества отверстий.

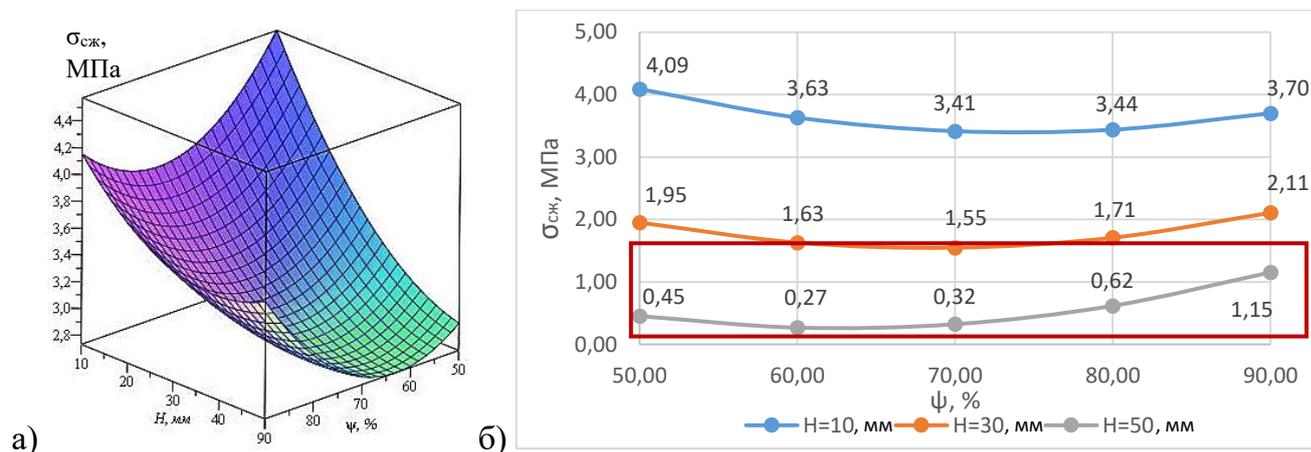


Рисунок 4.23 – График зависимости предела прочности на сжатие смесителя:
 а – 3-мерное изображение зависимости $\sigma_{сж} = f(\psi, H)$ при $p = 150$ КПа и $n = 35$ шт.;
 б – график зависимости $\sigma_{сж} = f(\psi, H)$ при $p = 150$ КПа и $n = 35$ шт

Графики зависимости $\sigma_{сж} = f(\psi, H)$ (рисунок 4.23, а и б) имеют параболический характер при фиксированных значениях $p = 150$ КПа, $n = 35$ шт. и для всех значений шага спирали H допустимые значения предела прочности на сжатие получаем:

- на всем интервале коэффициента загрузки от 50 до 90% и равняются интервалу 3,4-4,1 МПа для значения шага спирали $H = 10$ мм;
- в интервале давления от 50 до 100 КПа, а также от 200 до 250 КПа для шага спирали $H = 30$ мм и равны интервалу 1,7-2,1 МПа.

Анализ изменения предела прочности на сжатие при варьировании давления от 50 до 250 КПа показал, что графики носят параболический характер. Соответствующий стандарту требуемый предел прочности 1,5-5 МПа получаем преимущественно в интервале варьирования давления от 50 до 100 КПа и в точке значения давления 250 КПа:

- при $\psi = 70\%$, $H = 30$ мм и $n = 25, 35, 45$ шт. (рисунок 4.18) предел прочности на сжатие составляет 1,8-4,1 МПа на всем промежутке изменения давления, за исключением участка при 150-200 КПа и количества отверстий $n = 35$ и $n = 45$ шт., где показатели прочности ниже требуемых, это происходит из-за излишней интенсификации процесса смешивания;

- при $n = 35$ шт., $H = 30$ мм и $\psi = 50, 70, 90\%$ (рисунок 4.19), предел прочности на сжатие составляет 1,9-4,1 МПа на всем промежутке изменения

давления, за исключением участка 150-200 КПа при коэффициенте загрузки $\psi = 70\%$, что можно объяснить тем, что при указанных значениях параметров происходит снижение прочностных показателей смеси;

- при $n = 35$ шт., $\psi = 70\%$ и $H = 10$ мм, 30 мм (рисунок 4.20), предел прочности на сжатие составляет 2,05-4,3 МПа на всем промежутке изменения давления, за исключением:

- 1) шага спирали $H = 50$ мм на всем протяжении изменения давления;
- 2) шага спирали $H = 30$ мм и давлении 150-200 КПа;
- 3) шага спирали $H = 10$ мм и давлении 50 КПа;

это можно объяснить тем, что при увеличении шага спирали и давления сжатого воздуха интенсифицируется движение материала по всей длине камеры смешивания, что значительно понижает предел прочности.

Установлено, что целесообразно использовать давление равное 150 КПа, так как:

- при варьировании количества отверстий предел прочности на сжатие изменяется в пределах 1,6-4,6% при всех значениях коэффициента загрузки за исключением участка при $n = 35-45$ шт. и $\psi = 70\%$, (рисунок 4.21), потому что коэффициент загрузки имеет значимость 34%;

- при варьировании количества отверстий предел прочности на сжатие изменяется в пределах 1,6-4,2% при всех значениях шага спирали за исключением участка при шаге спирали $H = 30$ мм и $H = 50$ мм и $n = 35-55$ шт., и $H = 10$ мм и $n = 15$ (рисунок 4.22), потому что, чем больше шаг спирали и количество отверстий на ней, тем больше воздействие сжатого воздуха на смесь, но указанный режим негативно влияет на смешивание компонентов с различной плотностью.

Значения предела прочности менее 1,5 МПа и более 5 МПа [130, 131, 136] получаем:

1. При интервале давления 150-200 КПа, коэффициенте загрузки 70% и шаге спирали 30 мм при:

- $n = 35$ и $n = 45$ шт. предел прочности на сжатие (рисунок 4.18, б) в

интервале от 1,3 до 1,5 МПа;

- $n = 35$ шт. предел прочности на сжатие (рисунок 4.19, б) в интервале от 1,5 до 1,6 МПа;

- $n = 35$ шт. предел прочности на сжатие (рисунок 4.20, б) в интервале от 1,5 до 1,6 МПа.

2. При $n = 35$ шт. и $H = 50$ мм, предел прочности на сжатие (рисунок 4.20, б) в интервале от 0,3 до 1,5 МПа при давлении от 50 до 250 КПа.

3. При давлении 50 КПа, количестве отверстий на спирали 35 шт., коэффициенте загрузки равном 70% и шаге спирали 10 мм предел прочности на сжатие (рисунок 4.20, б) равен 5,7 МПа, что превышает допустимые значения.

При дальнейшем варьировании параметров (рисунок 4.21-4.23) характер поведения графиков повторяется, поэтому их описание нецелесообразно.

4.5 Определение рациональных параметров процесса смешивания в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой

Начальными данными для оптимизации являются полученные уравнения регрессии функций отклика (4.2), (4.7), (4.9), зависящие от основных параметров, позволяющие определить рациональные значения давления p , КПа, количество отверстий на спирали n , шт., коэффициента загрузки материала ψ , %, шага спирали H , мм.

Суммарное рассмотрение взаимодействия функций отклика от основных параметров дает полноценную характеристику процесса смешивания в пневматическом смесителе:

$$Q, Vc, \sigma_{сж} = f(p, n, \psi, H). \quad (4.11)$$

Основным критерием оценки качества теплоизоляционной штукатурки является предел прочности на сжатие, изменяющийся в пределах 1,5...5 МПа [130, 131, 136], который зависит от коэффициента неоднородности. А значения производительности принимаются в соответствии с выполнением требований (4.12) - (4.14):

$$\sigma_{\text{сж}} \rightarrow 1,5 \dots 5 \text{ МПа}, \quad (4.12)$$

$$V_c \rightarrow \min, \quad (4.13)$$

$$Q \rightarrow \max. \quad (4.14)$$

На графиках (рисунок 4.24) изображены графики производительности, коэффициента неоднородности, предела прочности при сжатии от варьируемых параметров: подаваемого давления, количества отверстий на спиральной трубке, коэффициента загрузки, шага спирали.

Совместный анализ графических зависимостей (рисунок 4.24) показал, что условия (4.12) - (4.14) выполняются при давлении равном 100 КПа при всех значениях количества отверстий на спирали, коэффициента загрузки и шага спирали. Выбранное значение подаваемого давления позволяет качественно смешать компоненты материала и избежать перерасхода сжатого воздуха.

При этом максимальная производительность смесителя равна 14,3 кг/ч, коэффициент неоднородности находится в пределах от 2,8 до 8,8 %, а предел прочности при сжатии изменяется от 1,8 до 4,3 МПа.

Установлено, что для получения теплоизоляционных материалов с использованием вермикулита нет необходимости в получении минимального коэффициента неоднородности смеси, главным показателем здесь является предел прочности на сжатие, так как его значения должны соответствовать стандарту [130, 131, 136].

Таким образом принимаем рациональные параметры пневматического смесителя:

- давление равное 100 КПа, которого достаточно, чтобы получить качественный процесс смешивания и при этом не допустить перерасхода сжатого воздуха;

- количество отверстий на спиральной трубке 35 шт., которых будет достаточно, чтобы провести качественное смешивание и не допустить излишнего расхода сжатого воздуха, как при большом количестве отверстий;

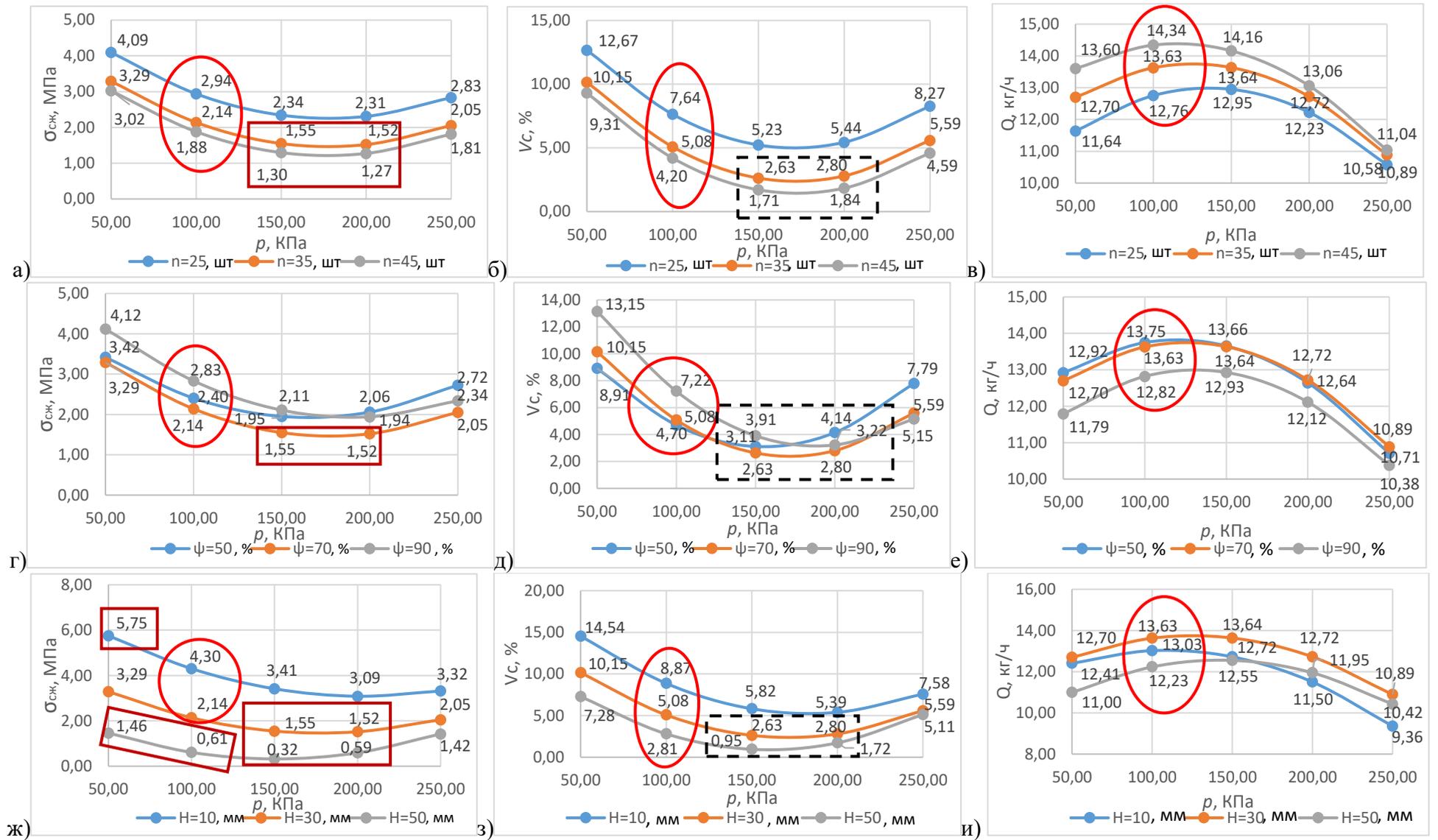


Рисунок 4.24 Графики зависимости:

а – график зависимости $\sigma_{сж} = f(p, n)$; б – график зависимости $V_c = f(p, n)$; в – график зависимости $Q = f(p, n)$;
 г – график зависимости $\sigma_{сж} = f(p, \psi)$; д – график зависимости $V_c = f(p, \psi)$; е – график зависимости $Q = f(p, \psi)$;
 ж – график зависимости $\sigma_{сж} = f(p, H)$; з – график зависимости $V_c = f(p, H)$; и – график зависимости $Q = f(p, H)$;

○ -требуемые значения, □ -недопустимые значения, ▭ - желаемый коэффициент неоднородности

- коэффициент загрузки равный 60-70%, так как при меньших и больших значениях снижается производительность;

- шаг спирали равный 30 мм, такой шаг позволяет беспрепятственно проходить материалу через спираль в камеру, т.к. она сосредоточена не в одной зоне камеры, а равномерно распределена по ней.

4.6 Сравнение результатов лабораторных экспериментов и теоретических расчетов

Для сравнения лабораторных исследований и теоретических расчетов было выполнено сравнение концентрации ключевого компонента при разных значениях количества отверстий на спиральной энергонесущей трубке.

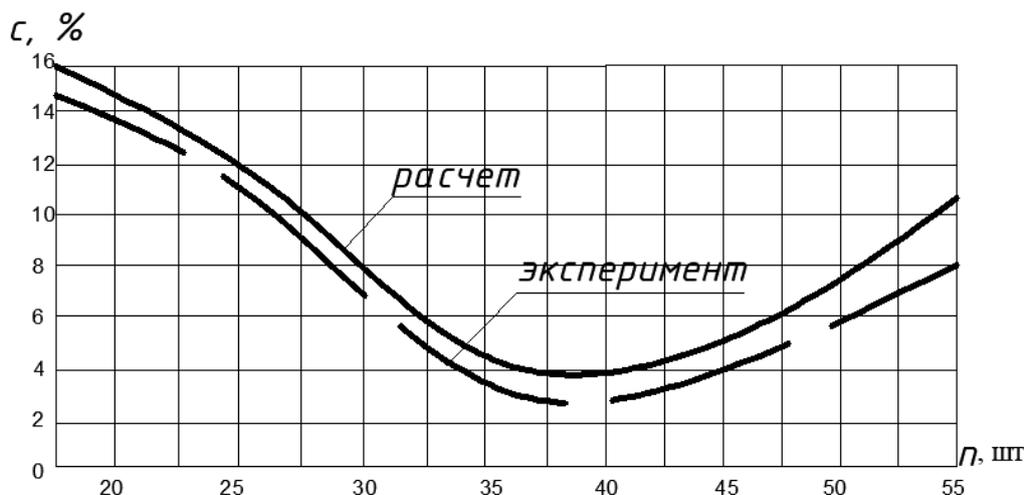


Рисунок 4.25 Сравнение результатов лабораторных экспериментов и теоретических расчетов по концентрации ключевого компонента

Из сравнительного анализа на рисунке 4.25 расхождение между лабораторными экспериментами и теорией составило не более 8 %.

Так же было выполнено сравнение концентрации ключевого компонента при разных значениях давления сжатого воздуха в камере смешивания.

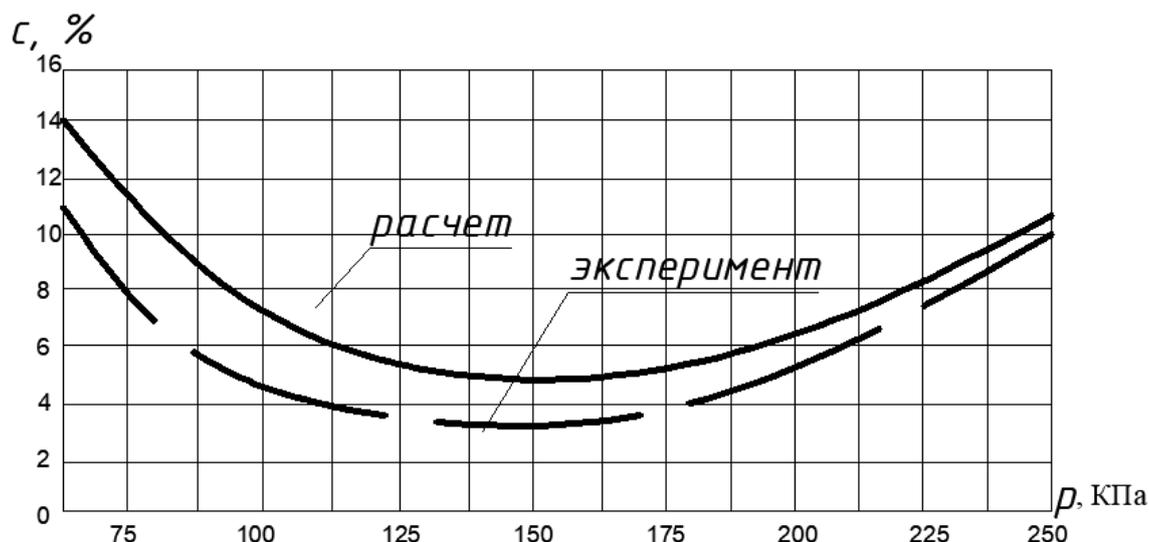


Рисунок 4.26 Сравнение результатов лабораторных экспериментов и теоретических расчетов по концентрации ключевого компонента

Из сравнительного анализа на рисунке 4.26 расхождение между лабораторными экспериментами и теорией составило не более 10 %.

4.7 Выводы

1. Проведены исследования с использованием математического планирования четырехфакторного эксперимента по смешиванию теплоизоляционной смеси в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой и проанализировав, влияющие на процесс смешивания факторы, были выбраны основные:

- давление сжатого воздуха $p = 50\text{-}250$ КПа;
- количество отверстий на спирали $n = 15\text{-}55$ шт.;
- коэффициент загрузки $\psi = 50\text{-}90\%$;
- шаг спирали $H = 0,010\text{-}0,050$ м.

2. Значимость основных факторов, оказывающих влияние на процесс смешивания, распределяются для:

- производительности смесителя Q , кг/ч: $p = 34\%$; $n = 54\%$; $\psi = 11\%$; $H = 1\%$;
- коэффициента неоднородности V_c , %: $p = 7,4\%$; $n = 9,3\%$; $\psi = 24,2\%$; $H = 59,1\%$;

- предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа: $p = 22\%$; $n = 21\%$; $\psi = 34\%$; $H = 23\%$.

3. Установлено, что максимальная экспериментальная производительность 15,2 кг/ч получена при фиксированном давлении равном 150 КПа, при наибольшей проходимости материала через витки спирали $H = 50$ мм и количестве отверстий $n = 55$ шт., а также максимальном коэффициенте загрузки $\psi = 90\%$ (теоретический максимум функции производительности равен 16,3 кг/ч получен при $H = 50$ мм, $n = 55$ шт., $\psi = 90\%$).

4. Установлено, что коэффициент неоднородности изменяется в пределах 1-4,7% при давлении равном 150 КПа, при $n = 35$ шт., $n = 45$ шт., $n = 55$ шт. и всех значениях шага спирали и коэффициента загрузки, т.к. они имеют наибольшую значимость 60 и 24 %, соответственно, при этом увеличение количества отверстий на спирали от 35 шт. до 55 шт. ведет к интенсификации процесса смешивания.

5. Установлено, что соответствующий стандарту требуемый предел прочности 1,5-5 МПа, получаем преимущественно в интервале варьирования давления от 50 до 100 КПа и в точке значения давления 250 КПа:

- при $\psi = 70\%$, $H = 30$ мм и $n = 25$ шт., $n = 35$ шт., $n = 45$ шт. (рисунок 4.20) предел прочности на сжатие составляет 1,8-4,1 МПа на всем промежутке изменения давления, за исключением участка при 150-200 КПа и количества отверстий $n = 35$ и $n = 45$ шт., где показатели прочности ниже требуемых, это происходит из-за излишней интенсификации процесса смешивания;

- при $n = 35$ шт., $H = 30$ мм и $\psi = 50\%$, $\psi = 70\%$, $\psi = 90\%$, предел прочности на сжатие составляет 1,9-4,1 МПа на всем промежутке изменения давления, за исключением участка 150-200 КПа при коэффициенте загрузки $\psi = 70\%$, что можно объяснить тем, что при указанных значениях параметров происходит снижение прочностных показателей смеси;

- при $n = 35$ шт., $\psi = 70\%$ и $H = 10$ мм, $H = 30$ мм, предел прочности на сжатие составляет 2,05-4,3 МПа на всем промежутке изменения давления, за исключением:

1) шага спирали $H = 50$ мм на всем протяжении изменения давления;

2) шага спирали $H = 30$ мм и давлении 150-200 КПа;

3) шага спирали $H = 10$ мм и давлении 50 КПа;

это можно объяснить тем, что при увеличении шага спирали и давления сжатого воздуха интенсифицируется движение материала по всей длине камеры смешивания, что значительно понижает предел прочности.

6. Совместный анализ графических зависимостей предела прочности на сжатие, коэффициента неоднородности, производительности показал, что при давлении равном $P = 100$ КПа, которое позволяет качественно смешать компоненты материала и избежать перерасхода сжатого воздуха, количестве отверстий на спирали $n = 35$ шт., коэффициенте загрузки $\psi = 60-70\%$ и шаге спирали $H = 30$ мм: предел прочности на сжатие изменяется от 1,8 до 4,3 МПа при значениях коэффициента неоднородности, изменяющегося в пределах от 2,8 до 8,8 %, а максимальная производительность смесителя равна 14,3 кг/ч.

5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

5.1 Промышленная апробация результатов работы

Предприятие АО "АПК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ" — это предприятие малого бизнеса, занимающееся добычей мела, производством сухих строительных смесей и минеральных теплоизоляционных материалов, которые применяются в строительной промышленности для утепления помещений и спрос на них со временем только возрастает. В состав таких смесей входит цемент с песком и теплоизоляционные добавки, такие как перлит или вермикулит. Основной проблемой при создании таких смесей является плотность этих добавок, которая в разы меньше плотности цемента с песком, что затрудняет возможность их смешивания. В связи с малой плотностью частиц компонентов нецелесообразно применять механическое воздействие на эти частицы, потому что они доизмельчаются, поэтому для получения таких смесей необходимо применять смешивание в пневматических смесителях (приложение 5 и 6).

Производство теплоизоляционных материалов АО "АПК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ" выполняется по технологической схеме (рисунок 5.1). Портландцемент, песок и вермикулит доставляется автомобильным транспортом и сгружается в приемочные бункера 1, 2 и 3. Добавки отгружаются на склад и после ссыпаются в бункер 4. Портландцемент 1 и песок 2 из складских бункеров при помощи насоса 7 подаются в шаровую мельницу 10 для изготовления композиционного вяжущего. После, через шнековый питатель 8 поступают вместе с дозированной подачей вермикулита 3 и добавок 4 в смеситель 9, где подготовленные и взвешенные компоненты перемешиваются. После этого сухая теплоизоляционная смесь по ленточному конвейеру 11 подается в дозатор для готовой продукции 12, а затем, передается на упаковку в упаковочной машине 13 и направляется по ленточному конвейеру 11 на склад готовой продукции 14. Со склада упакованная продукция погружается на транспорт и отгружается потребителям.

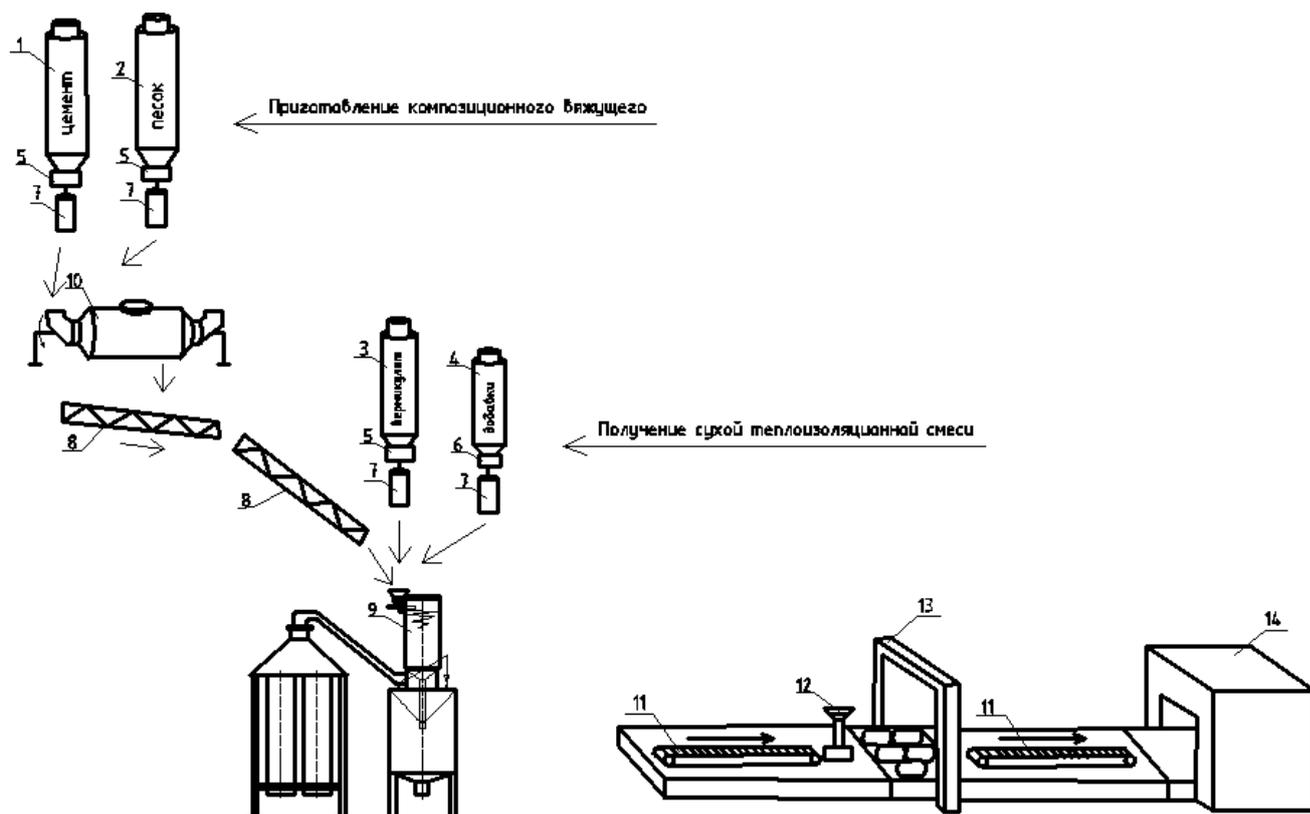


Рисунок 5.1 Технологическая схема получения сухой строительной смеси теплоизоляционной штукатурки на АО "АППК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ»:

- 1 - бункер портландцемента; 2 - бункер песка; 3 - бункер вермикулита; 4 - бункер добавок;
 5 - дозаторы цемента, песка и вермикулита; 6 - дозатор добавок; 7 - насосы; 8 - шнековый транспортер;
 9 - смеситель; 10 - шаровая мельница; 11 - ленточный конвейер; 12 - дозатор готовой продукции;
 13 - упаковочная машина; 14 - склад готовой продукции

Теплоизоляционные смеси, выпускаемые по технологической схеме АО "АППК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ», должны обладать следующими свойствами и характеристиками [130, 131, 136]:

1. Прочность при сжатии в 28-суточном возрасте – 1,5-5 МПа.
2. Плотность 1100-1600 кг/м³.

Предприятием АО "АППК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ» было предложено исследовать новые составы теплоизоляционных материалов (таблица 5.1) при использовании цемента марок 300 и его предварительной подготовке цемента марки 300 (измельчение в течение 10, 15 мин) (таблица 5.2) на предмет соответствия их технологическим характеристикам с использованием нового пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой, имеющим следующие технологические и конструктивные характеристики:

Давление энергоносителя, КПа.....	150
Размер частиц исходного материала, мм.....	$\leq 0,1$
Производительность, кг/ч.....	≤ 20
Габаритные размеры камеры смешивания, м:	
-диаметр.....	0,400
-высота.....	0,900
Габаритные размеры установки, м:	
-длина.....	3
-ширина.....	1,5
-высота.....	2,5
Масса, кг.....	50

Таблица 5.1

Составы, исследуемого теплоизоляционного материала АО "АППК
«БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ»

Компонент	Соотношение 1	Соотношение 2	Соотношение 3
Портландцемент ПЦ М300	1	1	1
Кварцевый песок	1	1,5	2
Вермикулит	2	1,5	1

Таблица 5.2

Состав и характеристики исследуемых образцов

Блоки	Время помола	Соотношение	Предел прочности	Плотность
1-1	-	1:1:2	3	1170
1-2	10	1:1:2	3,2	1253
1-3	15	1:1:2	3,5	1301
2-1	-	1:1,5:1,5	4,1	1395
2-2	10	1:1,5:1,5	4,3	1453
2-3	15	1:1,5:1,5	5,2	1500
3-1	-	1:2:1	5,5	1573
3-2	10	1:2:1	5,7	1587
3-3	15	1:2:1	5,7	1705

По результатам проведенных исследований (рисунок 5.2) установлено, что состав с соотношением компонентов 1:1:2 (таблицы 5.1 и 5.2) соответствует свойствам и характеристикам стандарта [134, 135, 140], также он обходит другие

составы по ценовой категории за счет того, что вермикулит — это качественный и дешевый теплоизоляционный наполнитель (состав с соотношением компонентов 1:1:2 (14 300 руб/т) на 12% дешевле, чем состав 1:1,5:1,5 (15 975 руб/т) и на 23%, чем состав 1:2:1 (17 650 руб/т)).

Данный пневматический смеситель позволяет получить сухую теплоизоляционную смесь с необходимыми качественными физико-механическими свойствами без расслоения на составляющие компоненты и позволяет смешивать материал с низкой плотностью.

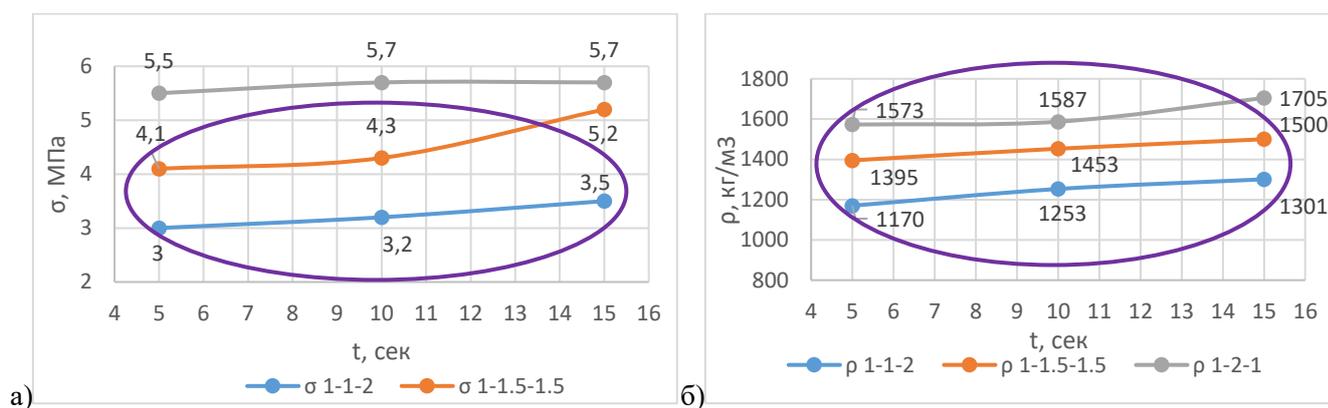


Рисунок 5.2 Характеристики исследуемых образцов в зависимости от состава:
а - изменение предела прочности от времени доизмельчения цемента;
б - изменение плотности от времени доизмельчения цемента
 ○ - допустимые значения

Анализ графиков (рисунок 5.2) показал, что, изменения качественных показателей плотности и прочности на сжатие теплоизоляционного материала напрямую зависят от времени доизмельчения цемента, чем больше времени цемент находится в мельнице, тем ниже качественные теплоизоляционные показатели образцов, при этом происходит увеличение плотности и прочности на сжатие и, как следствие, уменьшение их пористости:

- состав с соотношением компонентов 1:1,5:1,5 имеет в среднем на 29 % больше прочность на сжатие и на 15 % больше плотность, чем при составе 1:1:1;
- состав с соотношением компонентов 1:2:1 имеет в среднем на 43 % больше прочность на сжатие и на 23% больше плотность, чем при составе 1:1:1.

Доизмельчать цемент нецелесообразно, так как использование цемента марки 300 в рецептуре дает необходимые характеристики теплоизоляционных материалов. Время подготовки компонентов смеси доизмельчением к

дальнейшему процессу перемешивания повышает энергоемкость и при этом увеличивается время на получение смеси. При этом в составах 1:1:2 и 1:1,5:1,5 получаем образцы с пределом прочности на сжатие 3 и 4,1 МПа и плотности 1170 и 1395 кг/м³, что по стандарту допустимо.

5.2 Внедрение результатов работы в учебный процесс

Разработанная и изготовленная лабораторная установка пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой применяется в комплексе с другими существующими установками для приготовления ССС и др. Составляя и выбирая оборудование для смесительного комплекса, с лабораторной установкой смесителя студенты получают навыки компоновки технологических линий и возможность расчета цепей оборудования, а также производить расчет отдельного оборудования (смесителя).

Разработанная методика расчета пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой, используется на занятиях для изучения и закрепления материала в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 15.03.02-21-Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов и специалистов по направлению подготовки 15.05.01-24 - Проектирование технологических машин и комплексов по дисциплинам «Технологические комплексы предприятий для производства вяжущих материалов и изделий на их базе» и «Механическое оборудование (общий курс)» (приложение 4).

5.3 Инженерная методика расчета конструкторско-технологических параметров пневматического смесителя

Параметры, определяющие рабочие характеристики пневматического смесителя, являются скорость v_B и давление p сжатого воздуха, плотность материала ρ_M , плотность сжатого воздуха ρ_B .

Исходя из производительности лабораторной установки пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой ($Q = 20$ кг/ч) при помощи выражения (2.119) найдем диаметр выходного патрубка D_0 , м:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4Q}{\rho_{\text{ср}} \vartheta_{\text{в}} \pi}}. \quad (5.1)$$

Скорость воздуха, м/с найдем из выражения (2.9):

$$\vartheta_{\text{в}} = \vartheta_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2. \quad (5.2)$$

Найдем сечение входного патрубка подачи материала, м²:

$$S_{\text{тр}} = \frac{\pi D_{\text{в}}^2}{4}. \quad (5.3)$$

где $D_{\text{в}}$ – диаметр патрубка подач материала, м.

Сжатый воздух, при помощи которого осуществляется процесс смешивания, расходуется на смешивание компонентов смеси, преодоление гидравлического сопротивления и сообщение направления движение материалу.

Объемный расход воздуха равен, м³/с (2.117):

$$Q_{\text{в}} = \frac{G}{\rho_{\text{в}}}. \quad (5.4)$$

Массовый расход сжатого воздуха G , кг/с, получим из выражения (2.116):

$$G = \sqrt{\frac{\pi^2 d_0^5 \left(\frac{(P_{\text{нач}}^2 - P_{\text{кон}}^2)}{R_{\text{гТ}}} + \frac{(\vartheta_{\text{нач}}^2 - \vartheta_{\text{кон}}^2) \rho^2}{2} \right)}{4\lambda H_0}}. \quad (5.5)$$

Диаметр отверстия на спиральной энергонесущей трубке, м, через которую поступает сжатый воздух определялся следующим соотношением:

$$d_{\text{т}} = \sqrt{\frac{4G}{\pi \cdot \vartheta_{\text{в}}}}. \quad (5.6)$$

Необходимое число отверстий на спиральной энергонесущей трубке, шт, находится из соотношения (2.5):

$$n = \frac{d_0^2}{d_1^2} \cdot \frac{\vartheta_0}{\vartheta_1}. \quad (5.7)$$

Высота спирали, мм, подбирается из соотношения:

$$H_{\text{с}} = \frac{1}{2} H_0. \quad (5.8)$$

Для устойчивого вертикального пневматического смешивания компонентов по заданному расходу воздуха определяется диаметр сопла на спиральной трубке, м:

$$d_c = \frac{G}{\rho_B \cdot v_B}. \quad (5.9)$$

Объем цилиндрической камеры смешивания, м³, рассчитывается следующим способом:

$$V_{CM} = \pi \cdot R^2 \cdot H_0, \quad (5.10)$$

где R – радиус цилиндрической камеры, м.

Мощность, затрачиваемая на сжатие воздуха в компрессоре, Вт, рассчитывается следующим образом [14]:

$$P_K = 1,69 G_M R T_a \ln \left(\frac{p}{p_a} \right), \quad (5.11)$$

где T_a, p_a – абсолютное давление, Па и температура атмосферного воздуха, °С
 $G_{M.p.}$ – массовый расход смешиваемого материала, кг/с.

$$G_{M.p.} = G \cdot X, \quad (5.12)$$

где G – расход сжатого воздуха, м³/ч (2.116).

5.4 Технико-экономические результаты работы

Эффективность разработанного пневматического смесителя оценим, сравнив технологические показатели установки и ее работу с существующими аналогичными установками.

По результатам расчета предполагаемой экономической эффективности (приложение 7) данная разработка целесообразна к внедрению, так как срок окупаемости составляет 1,3 года при капиталовложениях на НИР 390 411 руб.

Большие капиталовложения на НИР обусловлены покупкой лицензионного программного обеспечения и дорогостоящей компьютерной вычислительной техники, а также затратами на изготовление установки и заработной платы научным сотрудникам.

5.5 Выводы

1. Исследования в составе технологической линии по производству теплоизоляционных смесей предприятия АО "АППК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ» показали целесообразность использования пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой для производства сухих смесей.

2. Установлено, что при подготовке теплоизоляционных смесей нецелесообразно доизмельчать цемент более 5 мин, так как это приводит к нерациональным энергозатратам и увеличению плотности и прочности на сжатие и, как следствие, уменьшению пористости образцов:

- состав с соотношением компонентов 1:1,5:1,5 имеет в среднем на 29 % больше прочность на сжатие и на 15 % больше плотность, чем состав 1:1:1;

- состав с соотношением компонентов 1:2:1 имеет в среднем на 43 % больше прочность на сжатие и на 23% больше плотность, чем состав 1:1:1.

3. При измельчении цемента в течение 5 мин наилучший результат получен:

- при соотношении компонентов 1:1:2 (1 часть цемента, 1 часть песка, 2 части вермикулита) прочность на сжатии образца по истечению 28 сут - 3 МПа и плотность 1170 кг/м³, стоимость такой смеси составляет 14 300 руб/т;

- при соотношении компонентов 1:1,5:1,5 (1 часть цемента, 1,5 части песка, 1,5 части вермикулита) прочность на сжатии образца по истечению 28 сут – 4,1 МПа и плотность 1395 кг/м³, стоимость такой смеси составляет 15 975 руб/т;

- при соотношении компонентов 1:2:1 (1 часть цемента, 2 части песка, 1 часть вермикулита) прочность на сжатии образца по истечению 28 сут – 5,5 МПа и плотность 1573 кг/м³, стоимость такой смеси составляет 17 650 руб/т;

таким образом, целесообразно выпускать теплоизоляционную смесь с соотношением компонентов 1:1:2, т.к. ее технические показатели соответствуют техническим нормам по выпуску этих смесей, и она дешевле на 12% и 23% по сравнению с составами 1:1,5:1,5 и 1:2:1 соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучено состояние и уровень развития техники и технологии получения сухих теплоизоляционных материалов. Определены проблемные задачи смешивания компонентов, составляющих смесь, с учетом их физико-механических свойств. Установлено, что для смешивания компонентов с различными плотностями, в частности, в смесях с вермикулитом, целесообразно применять пневматические смесители.

2. Для повышения эффективности смешивания предложена патентно-чистая конструкция пневматического смесителя со спиральной эргонесущей трубкой, позволяющая получать сухие строительные смеси требуемого стандартами качества.

3. Установлены закономерности движения воздушного потока в камере смешения пневматического смесителя. Получены аналитические выражения, определяющие компоненты вектора скорости воздушного потока в пневматическом смесителе со спиральной эргонесущей трубкой. Аналитические выражения позволяют определить работоспособность и целесообразность геометрии камеры смешения.

4. Получено аналитическое выражение, описывающее изменение концентрации выделенного компонента в объеме цилиндрической камеры смешения. Установлено, что изменение концентрации зависит, преимущественно, от местоположения частиц в камере, например, возле спиральной трубки на высоте камеры H_0 равной $\frac{1}{2}$ высоты спиральной трубки, концентрация $c = 0,85$. При этом, чем ниже компонента находится в камере смешения, тем ниже будет концентрация в центре камеры и при изменении значения H_0 от 0,6 до 1 м значение выделенной компоненты в центре камеры изменяется от 0,85 до 0,55. Увеличение среднего радиуса витка спирали r_0 от 0,075 до 0,125 м ведет к улучшению процесса смешивания за счет воздействия сжатого воздуха на смешиваемый материал и минимизации участков с минимальным воздействием воздуха на компоненты. Таким образом, на выходе из цилиндрической камеры у

ее стенки концентрация равна 0,05, что не противоречит теории пневматического смешения.

5. С использованием центрального композиционного рототабельного плана (ЦКРП 2⁴) полного факторного эксперимента исследован процесс смешивания теплоизоляционной смеси в пневматическом смесителе. В результате чего получены уравнения регрессии часовой производительности, коэффициента неоднородности смеси и предела прочности на сжатие образцов готового продукта от основных факторов $Q, V_c, \sigma_{сж} = f(p, n, \psi, H)$, где p – давление, подаваемое в спиральную энергонесущую трубку, КПа; n – количество отверстий на спирали, шт.; ψ – коэффициент загрузки материала, %; H – шаг спирали, мм. Расхождение между лабораторными экспериментами и теорией составляет не более 8 %.

6. В результате анализа графических зависимостей предела прочности на сжатие образцов готового продукта, коэффициента неоднородности готовой смеси, производительности смесителя выбраны рациональные конструктивные и технологические параметры смешения компонентов: шаг спирали $H = 30$ мм; количество отверстий на спирали $n = 35$ шт; давление $p = 100$ Кпа и коэффициент загрузки $\psi = 60-70$ %. При указанных значениях: предел прочности на сжатие готовых образцов изменяется с 1,8 до 4,3 МПа, значение коэффициента неоднородности готовой смеси изменяется в диапазоне 2,8-8,8 %, а максимальная производительность смесителя равна 14,3 кг/ч.

7. В результате выполнения работы были разработаны алгоритм расчета пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой и конструкторская документация, по которой изготовлен и испытан опытно-промышленный образец смесителя.

8. По результатам исследования работы пневматического смесителя в составе технологической линии по производству теплоизоляционных смесей предприятия АО "АПК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ» установлено, что наиболее целесообразно соотношение компонентов в композиционной теплоизоляционной смеси 1:1:2 (цемент : песок : вермикулит). Предприятием АО "АПК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ» внедрен полупромышленный образец пневматического

смесителя со спиральной энергонесущей трубкой для получения теплоизоляционных смесей, соответствующих техническим условиям стандарта.

Рекомендации. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований рекомендуются для промышленного применения при получении различных по назначению и свойствам сухих строительных смесей с гарантированными физико-механическими и технологическими характеристиками.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в совершенствовании процесса смешивания сыпучих материалов за счет изменения конструктивных и технологических параметров пневматического смесителя в ходе выполнения задач по получению качественного готового продукта при минимальных энергозатратах и изменяющихся требованиях, которые могут предъявляться к сухим строительным смесям.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ССС – сухие строительные смеси;

A – рабочая площадь сечения образца, m^2 ;

a_0 – свободный коэффициент уравнения регрессии;

a_i – коэффициенты при линейной зависимости;

a_j – коэффициент при факторах варьирования в уравнении регрессии;

a_{jj} – коэффициенты при квадратичном взаимодействии факторов;

a_{ij} – коэффициенты при парном взаимодействии факторов;

c – концентрация выделенной компоненты;

C_0 – концентрация по массе компонента при идеальном его распределении, %;

c_0 – начальное значение концентрации выделенной компоненты сухой смеси сыпучего материала, %;

C_i – отдельные значения концентрации по массе одного из компонентов в пробах, %;

c_1, c_2, c_3, c_4 – произвольные постоянные;

c_B – концентрация воздуха, %;

$c_{зад}$ – заданная концентрация ключевого компонента, %;

c_M – концентрация материала, %;

c_K – конечное значение концентрации сухой смеси сыпучего материала;

c_x – коэффициент аэродинамического сопротивления;

D – диаметр сечения камеры, м;

D_0 – диаметр выходного патрубка, м;

D_z и D_r – параметры продольного и радиального перемешивания;

d – диаметр частиц смеси, мм;

d_c – диаметр сопла, м;

d_k – диаметр камеры смешивания, м;

$d_э$ – эквивалентный диаметр частиц, м;

d_0 – диаметр спиральной энергонесущей трубки, м;

e_r, e_φ, e_z – единичные орты;
 F_p – критерий Фишера;
 $G_{м.р.}$ – массовый расход смешиваемого материала, кг/с;
 G_M – минимальный вес пробы, гр.;
 H – шаг спирали, мм;
 H_0 – высота от начала координат до конца цилиндрической части камеры смешения, м;
 H_B – высота от начала координат до конца камеры смешения, м;
 $I_0(\xi)$ и $K_0(\xi)$ – модифицированные функции Бесселя нулевого порядка;
 $I_1(\xi)$ и $K_1(\xi)$ – модифицированные функции Бесселя первого порядка;
 $J_0(\beta\xi_2)$ – является функцией Бесселя первого рода нулевого порядка;
 k – количество сил, которые действуют на частицу, шт.;
 $k_{кр}$ – вычисленная дисперсия;
 $k_{кр\text{табл}}$ – табличное значение критерия Кохрена;
 k_ϕ – коэффициент формы частицы;
 k_ε – эквивалентная шероховатость поверхности;
 L_T – длина камеры смесителя, м;
 l_c – расстояние между выходными отверстиями в пневматическом смесителе, м;
 l_T – длина спиральной трубки, м;
 n – число отверстий в спиральной энергонесущей трубке, шт;
 n_1 – количество измерений;
 $n_{проб}$ – число взятых проб, шт.;
 n_χ – число частиц ключевого компонента в пробе минимального веса, шт.;
 p – давление подаваемое в энергонесущую трубку, Па;
 p_0 – давление в цилиндрической камере, Па;
 p_1 – давление в спиральной энергонесущей трубке, Па;
 p_a – абсолютное давление, Па;
 p_k – давление в смесителе, Па;
 $p_{кон}$ – конечное давление в смесителе, Па;

$p_{нач}$ – начальное давление в смесителе, Па;
 $\Delta p_{пот}$ – потеря давления, Па;
 $p_{раб}$ – давление воздуха на входе в смеситель, Па;
 $p_{раз}$ – разрушающая нагрузка, Н;
 p_c – давление в сопле, Па;
 $p_{см}$ – подаваемое в смеситель давление воздуха, Па;
 $p_{сын}$ – противодействие насыпного слоя, Па;
 $\Delta p_{тр}$ – расходная концентрация давления, Па;
 p_p – рабочее давление в подводящей магистрали, Па;
 Q_0 – объем воздуха, поступающий в смеситель, кг/м³;
 Q_v – объемный расход воздуха, покидающий камеру смесителя, кг/м³;
 Q_m – объемный расход материала, м³/ч;
 $Q_{м.р.}$ – массовый расход материала, кг/ч;
 q – расход воздуха, м³/с;
 R – предел прочности на сжатие, МПа;
 R_k – радиус камеры смешения, м;
 Re – число Рейнольдса;
 R_g – универсальная газовая постоянная, Дж / (моль·К);
 r_0 – средний радиальный размер спирали, подающей воздух в камеру смесителя, м;
 r_k – средний радиус конической части камеры смешивания, м;
 r, φ, z – цилиндрическая система координат;
 S – сечение отверстия на спиральной трубке, м²;
 $S_б$ – сечение приемной камеры, м²;
 S_k – площадь сечения камеры смесителя, м²;
 S_c – площадь сечения сопла, м²;
 $S_{\{b_{jj}\}}$ – квадратичная ошибка коэффициента регрессии;
 s_b – ошибка в определении коэффициента регрессии;
 T – температура воздушного потока, К;

T_a – абсолютная температура атмосферного воздуха, °;

t – время движения частицы, с;

t_p – коэффициент фактора;

$t_{\text{табл}}$ – табличное значение критерия Стьюдента;

V – объем цилиндрического корпуса смесителя, м³;

V_1 – объем выходного патрубка, м³;

V_c – коэффициент неоднородности, %;

v – объем смешиваемого материала, м³;

ϑ – скорость движения частицы в потоке энергоносителя, м/с;

ϑ_0 – скорость поступления воздуха в спиральную энергонесущую трубку, м/с;

ϑ_1 – скорость истечения воздуха из каждого отверстия, м/с;

ϑ_v – скорость воздуха, м/с;

$\vartheta_{\text{кон}}$ – скорость в конце камеры, м/с;

ϑ_m – скорость материала на входе в пневматический смеситель, м/с;

$\vartheta_{\text{нач}}$ – скорость в начале камеры, м/с;

ϑ_r – компонента радиальной скорости, м/с;

ϑ_z – компонента продольной скорости, м/с;

$\overline{\vartheta_z}$ – скорость продольного движения материала, м/с;

$v_{\text{вит}}$ – скорость витания, м/с;

v_c – скорость воздуха в сопле, м/с;

X – число частиц смеси в единице объема;

x_k – обозначение фактора варьирования в кодированном виде;

x_n – обозначение фактора варьирования в натуральном виде;

$x_{\text{ср}}$ – значение нулевого уровня варьирования фактора;

x_i, x_j – исследуемые независимые переменные;

x_{i0} – натуральное значение основного (нулевого) уровня фактора;

y – функция отклика;

Y_0 – функция Бесселя 2-го рода;

z_k – высота от конца спиральной трубки до среднего радиуса конической части камеры смешивания, м;

ξ_1 и ξ_2 – безразмерные переменные;

μ – расходная концентрация сыпучего материала, кг/кг;

ν – вязкость воздуха, Па·с;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

ρ_v – плотность воздушного потока, кг/м³;

ρ_m – плотность материала, кг/м³;

ρ_n – средняя насыпная плотность материала, кг/м³;

$\rho_{ср}$ – средняя плотность смешиваемых компонентов, кг/м³;

$\sigma_{приб}$ – приборная погрешность;

σ_n^2 – значение полученной погрешности измерений;

ψ – скалярная функция, представляющая потенциал скорости;

λ – коэффициент гидравлического сопротивления;

Δ – оператор Лапласа;

$\Delta x_{случ}$ – случайная погрешность измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Алимов, Л.А.** Строительные материалы: учеб. пособие для бакалавров, обуч. по направлению "Строительство" [Текст] / Л.А. Алимов, В.В. Воронин. – М.: Академия, 2012. – 319 с.
2. **Абрамович, Г.Н.** К расчету разрежения за плоской струей и системой круглых струй, выдуваемых под углом к ограниченному сносящему потоку [Текст] / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, А.Н. Гришин // Известия вузов. Авиационная техника. – 1985. – № 2. – С. 3-7.
3. **Алимов, Л.А.** Строительные материалы: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования [Текст] / Л.А. Алимов, В.В. Воронин. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 320 с.
4. **Анциферов, С.И.** Анализ современного рынка оборудования для производства сухих строительных смесей [Текст] / С.И. Анциферов, Е.Г. Пахотин // В сб.: Образование, наука, производство. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 1402-1405.
5. **Балагуров, И.А.** Кинетика формирования многокомпонентных смесей разнородных дисперсных материалов: дис. ... канд. техн. наук 05.17.08 [Текст]. – Иваново: ИГХТУ, 2018. – 131 с.
6. **Балагуров, И.А.** Моделирование кинетики смешивания разнородных сыпучих материалов [Текст] / И.А. Балагуров, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 6. – С. 67-70.
7. **Бараковских, Д.С.** Движение двухфазного потока в разгонной трубке струйной мельницы [Текст] / Д.С. Бараковских, С.Ф. Шишкин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – №5. – С. 82-88.
8. **Баталин, Б.С.** Исследования эффективности добавок, применяемых для производства сухих строительных смесей [Текст] // Успехи современного естествознания. – 2007. – №7. – С. 50-52.
9. **Баранцева, Е.А.** Математическая модель кинетики лопастного перемешивания сыпучих материалов [Текст] / Е.А. Баранцева, В.Е. Мизонов, С.В.

Федосов, Ю.В. Хохлова // Строительные материалы. – 2008. – №2 – С. 64-65.

10. **Баренцева, Е.А.** Процессы смешения сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчёт [Текст] / Е.А. Баренцева, В.Е. Мизонов, Ю.В. Хохлова. – Иваново: Изд-во ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2008. – 116 с.

11. **Барилевич, В.А.** Основы термогазодинамики двух разных потоков и их численное решение [Текст]. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2009. – 190 с.

12. **Белецкий, Б.Ф.** Строительные машины и оборудование: справочное пособие [Текст] / Б.Ф. Белецкий, И.Г. Булгакова: 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 608 с.

13. **Берлинер, Э.М.** САПР конструктора машиностроителя [Текст] / Э.М. Берлинер, О.В. Таратынов. – М.: Инфра-М, 2015. – 288 с.

14. **Бирюков, Ю.А.** Пневматические методы и аппараты порошковой технологии [Текст] / Ю.А. Бирюков, А.Т. Росляк, В.Н. Пачин – М.: Томск, 1990. – 274 с.

15. **Бобков, С.П.** Использование дискретных стохастических моделей в химической кинетике [Текст] / С.П. Бобков, Е.С. Бобкова, В.В. Рыбкин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55. – № 9. – С. 35-39.

16. **Богданов, В.В.** Эффективные малообъемные смесители [Текст] / В.В. Богданов, Е.И. Христофоров, Б.А. Клоунг. – Л.: Химия, 1989. – 224 с.

17. **Богданов, В.С.** Аналитические исследования потерь давления при разделении и слиянии воздушных потоков в камере сепаратора противоточной струйной мельницы [Текст] / В.С. Богданов, И.Н. Логачев, В.А. Уваров, В.Г. Дмитриенко // В сб.: Промышленность строительных материалов в стройиндустрии, энерго и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1997. – Ч. 4. – С. 94-99.

18. **Богданов, В.С.** Механическое оборудование предприятий промышленности стройматериалов [Текст] / В.С. Богданов, Н.П. Несмеянов, В.З. Пироцкий, А.И. Морозов. – Белгород, 1998. – 180 с.

19. **Богданов, В.С.** Анализ смесительного оборудования для сухих строительных смесей [Текст] / В.С. Богданов, Н.П. Несмеянов, Ю.В. Бражник, П.С. Горшков // В сб.: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. – Вып. XI. – С. 70-73.

20. **Богданов, В.С.** Процессы в производстве строительных материалов [Текст] / В.С. Богданов, Д.В. Богданов, И.А. Семикопенко. – Старый Оскол: ТНТ, 2018. – 436 с.

21. **Богданов, В.С.** Основы расчета машин и оборудования предприятий строительных материалов и изделий [Текст] / В.С. Богданов, Р.Р. Шарапов, Ю.М. Фадин, И.А. Семикопенко, Н.П. Несмеянов, В.Б. Герасименко. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 680 с.

22. **Богданов, В.С.** Пути увеличения степени однородности сухих строительных смесей с целью формирования максимального их качества [Текст] / В.С. Богданов, Ю.В. Бражник, Н.П. Несмеянов, П.С. Горшков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – №4. – С. 62-64.

23. **Бражник, Ю.В.** Совершенствование конструкции и процесса смешивания в лопастном смесителе с высокоскоростным режимом работы: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 [Текст] – Белгород, 2017. – 195 с.

24. **Вараксин, А.Ю.** Столкновения в потоках газа с твердыми частицами [Текст]. – М.: Физматлит, 2008. – 312 с.

25. **ВСН 83-92.** Ведомственные строительные нормы «Технические указания по применению бетонов и цементно-песчаных растворов, твердеющих на морозе, при строительстве искусственных сооружений» [Текст].

26. **Веригин, А.И.** Динамика смешивания бинарных композиций дисперсных частиц [Текст] // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2010. – №8 (34). – С. 63-67.

27. **Верлока, И.И.** Современные гравитационные устройства непрерывного

действия для смешивания сыпучих компонентов [Текст] / И.И. Верлока, А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев // Инженерный вестник Дона. Электронный журнал, — 2014. – № 4.

28. **Верлока, И.И.** Применение экспресс-метода оценки показателей качества двухкомпонентных сыпучих смесей [Текст] / И.И. Верлока, А.Е. Лебедев // 68-я Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: сб. матер. конф. – Ярославль: Изд-во Дом ЯГТУ, 2015. – С. 427-429.

29. **Войлоков, И.А.** Состояние отечественного рынка оборудования для производства сухих строительных смесей от 27.06.2022. [Эл. ресурс]. URL: http://www.concrete-union.ru/articles/dry_mixes.php?ELEMENT_ID=5545.

30. **Гаврилов, В.С.** Функции Бесселя в задачах математической физики: учебно-методическое пособие [Текст] / В.С. Гаврилов, Н.А. Денисова, А.В. Калинин. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2014. – 40 с.

31. **Горшков, П.С.** Новые способы комплексного снижения энергетических затрат при получении сухих строительных цементных смесей [Текст] / П.С. Горшков, Н.П. Несмеянов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – №2. – С. 49-51.

32. **Горшков, П.С.** Описание процесса изменения концентрации ключевого компонента при получении сухих строительных смесей [Текст] / П.С. Горшков, Н.П. Несмеянов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – №1. – С. 45-48.

33. **ГОСТ 2.001-2013.** Единая система конструкторской документации (ЕСКД) [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2013. – 8 с.

34. **ГОСТ 25328-82.** Цемент для строительных растворов. Технические условия [Текст]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 4 с.

35. **ГОСТ 31189-2003.** Смеси сухие строительные. Классификация [Текст]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 5 с.

36. **ГОСТ 26633-2012.** Межгосударственный стандарт. Бетоны тяжелые и

мелкозернистые. Технические условия [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 18 с.

37. **ГОСТ 28013-98.** Растворы строительные. Общие технические условия [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 22 с.

38. **ГОСТ 31357-2007.** Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2008. – 9 с.

39. **ГОСТ 5802-86.** Растворы строительные [Текст]. – М.: Стандартинформ, 1986. – 19с.

40. **Гусак, А.А.** Справочник по высшей математике [Текст] / А.А. Гусак, Г.М. Гусак, Е.А. Бричикова. – Минск: Изд-во ТетраСистемс, 1999. – 640 с.

41. **Денисов, Г.А.** Производство и использования сухих строительных смесей [Текст] / Г.А. Денисов // Сухие строительные смеси. – 2011. – №1. – С. 14-18.

42. **Деревич, И.В.** Анализ пневматического транспорта дисперсных материалов в импульсном режиме подачи газа [Текст] / И.В. Деревич // Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана. Серия "Естественные науки". – 2012. – №2. – С. 35-45.

43. **Захарова, Е.Б.** Оборудование для производства модифицированных сухих строительных смесей [Текст] / Е.Б. Захарова, М.И. Одинокий // Строительные материалы. – 2005. – №9. – С. 58-59.

44. **Зедгинидзе, И.Г.** Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем [Текст]. – М.: Наука, 1976. – 390 с.

45. **Зозуля, П.В.** Оптимизация гранулометрического состава и свойств заполнителей и наполнителей для сухих строительных смесей [Текст] // Сухие строительные смеси для XXI века: Технологии и бизнес: сб. тез. 3-ей Междунар. конф., 2003. – С. 12-13.

46. **Ильина, А.И.** Экономика предприятия [Текст] / А.И. Ильина, В.П. Волкова. – М.: Новое знание, 2013. – 677 с.

47. **Капранова, А.Б.** К расчету объемной доли сыпучего компонента при порционном смешивании в гравитационном устройстве [Текст] / А.Б. Капранова, И.И. Верлока, П.А. Яковлев, С.В. Филиппов // Математические методы в технике и технологиях. Сб. трудов 30-й Междунар. науч. конф. в 12 т. – СПб.: Изд-во

Политехнического университета, 2017. – Т. 9. – С. 64-66.

48. **Капранова, А.Б.** Исследование ударного смешивания твердых дисперсных сред при вторичных столкновениях частиц [Текст] / А.Б. Капранова, М.Н. Бакин, А.Е. Лебедев, А.И. Зайцев // Известия ВУЗов. Химия и хим. технология. – 2013. – Т. 56. – № 6. – С. 83-86.

49. **Козлов, В.В.** Сухие строительные смеси [Текст] / В.В. Козлов. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 96 с.

50. **Кондрашенко, В.И.** Интегрированный подход к решению задач строительного материаловедения [Текст] / В.И. Кондрашенко, Д.А. Гребенников, С.В. Гузенко, А.В. Кендюк // Межд. конгресс «Наука и инновации в строительстве» SIB-2008. Современные проблемы строительного материаловедения и технологии. – 2008. – Том 1. – С. 235-240.

51. **Королёв, Е.В.** Нанотехнология в строительном материаловедении. Анализ состояния и достижений. Пути развития [Текст] / Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2014. – №11. – С. 47-60.

52. **Кондаков, А.И.** САПР технологических процессов: учебник для студ. высш. учеб. заведений; 3-е изд. [Текст] – М.: Издательский центр "Академия", 2010. – 272 с.

53. **Корнеев, В.И.** Современная классификация и особенности производства и применения сухих строительных смесей [Текст] / В.И. Корнеев // Сухие строительные смеси. – 2010. – №1. – С. 20-22.

54. **Корнеев, В.И.** Сухие строительные смеси [Текст] / В.И. Корнеев, П.В. Зозуля. – М: РИФ «Стройматериалы», 2009. – 320 с.

55. **Красовский, Г.И.** Планирование эксперимента [Текст] / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов – Минск.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.

56. **Кривцов, Е.Е.** Исследование характеристик наномодифицированных сухих строительных смесей [Текст] / Е.Е. Кривцов, Н.М. Никулин, Е.В. Ясинская // Инженерно-строительный журнал. – №2. – 2011. – С 29-32.

57. **Лебедев, А.Е.** Метод оценки коэффициента неоднородности смесей сыпучих сред [Текст] / А.Е. Лебедев // Инженерный вестник Дона. Электронный

журнал. – 2014. – № 4.

58. **Лебедев, А.Е.** Аппараты для переработки дисперсных сред. Теория и расчет: монография [Текст] / А.Е. Лебедев. – Ярославль: Изд. дом ЯГТУ, 2017. – 176 с.

59. **Леопольдер, Ф.** Глобальная индустрия сухих строительных смесей: международное развитие, тенденции, возможности и риски [Текст] / Ф. Леопольдер // Технологии & бизнес на рынке ССС. – 2010. – №2. – С. 1-2.

60. **Логанина, В.И.** Сухие строительные смеси для отделки стен зданий [Текст] / В.И. Логанина, И.С. Великанова, С.М. Саженко. – Пенза: ПГУ АС, 2005. – 117 с.

61. **Лозовая, С.Ю.** Применение аналитического пакета MAPLE для исследования конструктивно технологических параметров оборудования и моделирования техпроцессов на предприятиях стройиндустрии [Текст] / С.Ю. Лозовая, В.П. Воронов. – Белгород: Изд-во БИЭИ, 2007. – 179 с.

62. **Лозовой, Н.М.** Оценка прочностных характеристик изменяемой камеры смесителя периодического действия [Текст] // Межвузовский сборник статей: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. – Вып. X. – С. 165-169.

63. **Лозовой, Н.М.** Смеситель периодического действия с изменяющейся рабочей камерой: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 [Текст] – Белгород, 2011. – 149 с.

64. **Максютов, А.А.** Экономика предприятия. – М.: Альфа-Пресс, 2012. – 52 с.

65. **Мещерин, В.** Добавки и дополнительные компоненты в современной технологии производства [Текст] / В. Мещерин, М. Катц // СРІ Международное бетонное производство. – 2011. – №11. – С. 14-21.

66. **Мизонов, В.Е.** Новый подход к моделированию и оптимизации процессов в сыпучих материалах [Текст] / В.Е. Мизонов, В.П. Жуков, Е.А. Баранцева, Ю.В. Хохлова // Каталог 3-го Ивановского инновационного салона

«Инновации-2006». – Иваново, 2006. – С. 119-120.

67. **Мухопад, К.А.** Анализ физических и математических моделей пневмотранспорта сыпучих материалов [Текст] / К.А. Мухопад, В.П. Тарасов // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: сб. докл. 8-ой науч.-практ. конф. – Барнаул, 2005. – С. 3-12.

68. **Несмеянов, Н.П.** Анализ показателей качества сухих модифицированных строительных смесей [Текст] / Н.П. Несмеянов, Ю.В. Бражник, П.С. Горшков // Сб. докл. VII межд. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс». Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2014. – Том 1. – С. 162-163.

69. **Несмеянов, Н.П.** Смесители для производства ССС [Текст] / Н.П. Несмеянов, П.С. Горшков // Межвузовский сборник статей: Энергосберегающие строительные комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – С. 176-179.

70. **Несмеянов, Н.П.** Современные способы классификации ССС [Текст] / Н.П. Несмеянов, П.С. Горшков // Межвузовский сборник статей: Энергосберегающие строительные комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – С. 179-183.

71. **Несмеянов, Н.П.** Сравнительная оценка технологических схем заводов небольшой мощности по производству ССС [Текст] / Н.П. Несмеянов, П.С. Горшков // Межвузовский сборник статей: Энергосберегающие строительные комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2009. – С. 173-175.

72. **Орехова, Т.Н.** Анализ конструкций пневмосмесителей для производства сухих строительных смесей [Текст] / Т.Н. Орехова, В.А. Уваров // Интерстроймех-2010: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2010. – С. 92-94.

73. **Орехова, Т.Н.** К вопросу оценки качества смешения сухих строительных смесей [Текст] / Т.Н. Орехова, Л.Х. Загороднюк, А.В. Шкарин // Материалы и

технологии XXI века: сб. статей X Междунар. науч.-техн. конф. Пенза: Приволжский дом знаний, 2012. – С. 51-54.

74. **Орехова, Т.Н.** Пневмосмеситель непрерывного действия для производства сухих строительных смесей: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 [Текст] – Белгород, 2013. – 158 с.

75. **Пат.** 102533 РФ, МПК В 01 F 5/00. Пневмосмеситель непрерывного действия для производства сухих строительных смесей / Т.Н. Орехова, В.А. Уваров, А.Е. Качаев; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2010140830/05; заявл. 05.10.2010; опубл. 10.03.11, Бюл. №7. – 2 с.

76. **Пат.** 115682 РФ, МПК В 01 F 5/00. Пневмосмеситель многокомпонентных сухих строительных смесей / Т.Н. Орехова, В.А. Уваров, А.Е. Качаев; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2011151913/05; заявл. 19.12.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13. – 2 с.

77. **Пат.** RU 204403 U1 РФ, МПК В 01 F 5/00. Пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергонесущей трубкой / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, В.П. Воронов, Е.Г. Шеметов, Е.В. Лазько; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2020136892; заявл. 10.11.2020; опубл. 24.05.2021, Бюл. № 15. – 7 с.

78. **Пат.** RU 210920 U1 РФ, МПК В 01 F 5/00. Пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергонесущей трубкой / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, Е.Г. Шеметов, Л.Х. Загороднюк, К.Ш. Аль Мамури Саад; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2022119114; заявл. 24.11.2021; опубл. 13.07.2022, Бюл. № 15. – 7 с.

79. **Пат.** RU 214199 U1 Российская Федерация, МПК В 01 F 5/00. Пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, В.С. Богданов, Е.Г. Шеметов, С.С. Латышев; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2021134315; заявл. 13.05.2022; опубл. 24.11.2021, Бюл. № 14. – 7 с.

80. Перспективы рынка сухих смесей. – М: СтройПРОФИ. – №14.

81. **Першин, В.Ф.** Конструирование смесителей сыпучих материалов,

обеспечивающих стабильный уровень качества смеси [Текст] / В.Ф. Першин, М.М. Свиридов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1999. – №8. – С. 13-15.

82. **Пявченко, Т.А.** Проектирование АСУТП в SCADA-системе: учебное пособие [Текст]. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 84 с.

83. Российский рынок строительных смесей. Специализированный отраслевой справочник [Текст] / Союз производителей сухих строительных смесей. – СПб.: РИА «Квинтет», 2008. – 416 с.

84. **СНиП 5.01.23-03.** Типовые нормы расхода цемента [Текст]. – М.: Стройиздат, 2003. – 44 с.

85. Сухие смеси и их преимущества перед традиционными растворными смесями. Статья [Эл. ресурс] – ООО «Продсельмаш» URL: <https://prodselmash.ru/o-kompanii/stati/suhie-smesi-i-ih-preimusestva-pered-tradicionnymi-rastvornymi-smesami>.

86. Сухие строительные смеси: анализ технологий производства (Часть I). Статья [Эл. ресурс] URL: <http://www.newchemistry.ru>.

87. **Томченко, К.А.** Дозирование в технологии производства сухих строительных смесей [Текст] / К.А. Томченко // Сухие строительные смеси. – 2009. – №5-6. – С. 48-51.

88. **Уваров, В.А.** Процессы в производстве строительных материалов и изделий [Текст] / В.А. Уваров, И.А. Семикопенко, Г.И. Чемеричко. – Белгород: БелГТАСМ, 2002. – 121 с.

89. **Уваров, В.А.** Особенности математического моделирования газодетонационного измельчителя [Текст] / В.А. Уваров, А.Н. Потапенко // Известия Вузов. Строительство. – 2000. – № 11. – С. 39-45.

90. **Уваров, В.А.** Струйные мельницы [Текст] / В.А. Уваров, Р.Р. Шарипов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. – 144 с.

91. **Уваров, В.А.** Определение сил в смесителе с изменяемой рабочей камерой периодического действия [Текст] / В.А. Уваров, Н.М. Лозовой // Вестник

Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, – 2012. – №1. – С. 79-81.

92. **Фаликман, В.Р.** Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах [Текст] / В.Р. Фаликман // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 1. – С. 31-34.

93. **Чемеричко, Г.И.** Анализ современного рынка оборудования для производства сухих строительных смесей [Текст] / Г.И. Чемеричко, С.И. Анциферов, Е.Г. Пахотин // В сб.: Образование, наука, производство. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. – С. 1585-1588.

94. **Ширина, Н.В.** Строительные растворы. Прошлое и настоящее: [Текст] / Н.В. Ширина, Л.Х. Загороднюк. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 219 с.

95. **Шеметова, О.М.** Получение однородных мелкодисперсных смесей в пневмосмесителе [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, В.С. Богданов // СТИН. – № 3. – 2022. – С. 22-24.

96. **Шеметова, О.М.** Анализ технических средств для смешения сухих строительных смесей [Текст] / О.М. Шеметова, Е.Г. Шеметов // В сб.: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 3012-3015.

97. **Шеметова, О.М.** Сухие строительные смеси и смесительное оборудование для их производства [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 12. – С. 145-150.

98. **Шеметова, О.М.** Применение пневматических смесителей в строительстве [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин // В сб.: Механизация и автоматизация строительства. – 2020. – С. 250-254.

99. **Шеметова, О.М.** Выбор футеровки для пневмосмесителей [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, Е.Г. Шеметов, Е.В. Лазько, М.Ю. Яроцкая // В сб.: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для

производства строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 303-305.

100. **Шеметова, О.М.** Анализ технических средств для смешения сухих строительных смесей [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, Е.Г. Шеметов // В сб.: Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии. – 2020. – С. 148-151.

101. **Шеметова, О.М.** Технологические и компоновочные решения в производстве сухих строительных смесей [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, Е.Г. Шеметов, Е.В. Лазько, М.Ю. Яроцкая // В сб.: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 1864-1867.

102. **Шеметова, О.М.** Критерии оценки качества смеси [Текст] / О.М. Шеметова, Е.Г. Шеметов // В сб.: Образование. Наука. Производство. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 1001-1003.

103. **Шеметова, О.М.** Исследование процессе смешения в пневмосмесителе [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, Е.Г. Шеметов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 10. – С. 170-174.

104. **Шеметова, О.М.** Разработка и расчет математической модели пневмосмесителя для смешивания дисперсных материалов [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин // В сб.: Механизация и автоматизация строительства. – 2021. – С. 7-12.

105. **Шеметова, О.М.** Направление совершенствования пневматических смесителей [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, Е.Г. Шеметов // В сб.: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 265-272.

106. **Шеметова, О.М.** Современное состояние развития технологии смешивания сухих смесей [Текст] / О. М. Шеметова, Ю.М. Фадин, Е.Г. Шеметов // В сб.: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для

производства строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 281-283.

107. **Шеметова, О.М.** Использование пневмосмесительного оборудования для производства сухих строительных смесей [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2022. – С. 43-47.

108. **Шеметова, О.М.** Технологические линии в производстве сухих строительных смесей [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, Е.Г. Шеметов. – М.: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования "Белорусско-Российский университет", 2021. – 133 с.

109. **Шеметова, О.М.** Обзор смесителей для смешения сухих смесей [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин // В сб.: Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 147-151.

110. **Шеметова, О.М.** Экспериментальные исследования пневмосмесителя со спиральной энергонесущей трубкой [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, Е.Г. Шеметов // В сб: Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. Могилев, 2022. – С. 231-232.

111. **Шеметова, О.М.** Проведение лабораторных исследований в пневмосмесителе [Текст] / О.М. Шеметова, Е.Г. Шеметов // В сб.: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 58-61.

112. **Шеметова, О.М.** Обзор фирм производителей пневматических смесителей для производства сухих строительных смесей [Текст] / О.М. Шеметова, Е.Г. Шеметов // В сб.: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 62-66.

113. **Шеметова, О.М.** Разработка и исследования пневмосмесителя в программном продукте solid works [Текст] / О.М. Шеметова // В сб.: Молодежь и

научно-технический прогресс. – Губкин: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 101-104.

114. **Шеметова, О.М.** Основы методики расчета пневмосмесителя [Текст] / О.М. Шеметова. – М.: Белорусско-Российский университет. Могилев, 2022. – С. 96.

115. **Шеметова, О.М.** Проведение экспериментальных исследований процесса смешения в пневмосмесителе [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 16. – С. 83-88.

116. **Шеметова, О.М.** Математическое описание движения воздушной среды в цилиндрической камере пневмосмесителя [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2022. – № 3. – С. 38-44.

117. **Шеметова, О.М.** Лабораторная установка пневмосмесителя [Текст] / О.М. Шеметова, Е.Г. Шеметов, В.В. Мишенина // В сб.: IX Международной научно-технической конференции – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 59-61.

118. **Шеметова, О.М.** Моделирование траекторий движения частиц в вихревом смесителе сыпучих материалов [Текст] / О.М. Шеметова, О.Д. Ивашук, И.В. Удовенко // В сб.: IX Международной научно-технической конференции. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2023. – С. 220-224.

119. **Шеметова, О.М.** Процесс смешивания компонентов сыпучего материала в пневматическом смесителе [Текст] / О.М. Шеметова // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 17-2. – С. 273-280.

120. **Шеметова, О.М.** Проведение лабораторных исследований по определению неоднородности смеси в пневматическом смесителе [Текст] / Ю.М. Фадин, О.М. Шеметова, С.И. Анциферов, Л.Х. Загороднюк, К.Ш. Аль Мамури Саад // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и

производство.

– 2022. – № 17-1. – С. 144-150.

121. **Шеметова, О.М.** Вяжущие композиции с использованием вермикулита для теплозащитных растворов [Текст] / О.М. Шеметова, Л.Х. Загороднюк, К.Ш. Аль Мамури Саад, Д.А. Сумской, А.Л. Бочарников // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 2. – С. 8-19.

122. **Шеметова, О.М.** Смешение теплоизоляционных смесей в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой [Текст] / О.М. Шеметова, Л.Х. Загороднюк, К.Ш. Аль Мамури Саад, А.Л. Бочарников // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2023. – Т. 20. – № 1. – С. 144-150.

123. **Ширина, Н.В.** Сухие теплоизоляционные штукатурные смеси: дис. ... канд. техн. наук [Текст]. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2008. – 235 с.

124. **Ширина, Н.В.** К вопросу качества и методам исследования сухих смесей [Текст] / Н.В. Ширина, Л.Х. Загороднюк // Строительные и отделочные материалы. Стандарты XXI века: тр. XIII Междунар. сем. Азиатско-Тихоокеанской академии материалов. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). – 2006. – Т. 1. – С. 127-130.

125. **Шкарин, А.В.** К вопросу оценки качества смешения сухих строительных смесей [Текст] / А.В. Шкарин, Л.Х. Загороднюк, Т.Н. Орехова // Материалы и технологии XXI века: сб. статей X Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2012. – С. 51-54.

126. **Шубин, И.Н.** Сыпучие материалы и их свойства: учеб. пособие [Текст] / И.Н. Шубин, М.М. Свиридов, В.П. Таров. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та., 2005. – 76 с.

127. **Цюрбригген, Р.** Дисперсионные полимерные порошки особенности поведения в сухих строительных смесях (фирма «ELOTEX AG», Швейцария) [Текст] / Р. Цюрбригген, П. Дильгер // Строительные материалы. – 1999. – №3. – С. 10-12.

128. **Черниговский, А.С.** Внедрение новых технологий в производство бетонных изделий с целью экономии цемента [Текст] // ЖБИ и конструкции. – 2010. – № 2.

129. **Arratia, P.E.** A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote Blender via DEM simulations [Text] / P.E. Arratia, Duong, Nhat-hang, F.J. Muzzio, P. Godbole, S. Reynolds // Powder Technology. – 2006. – Т. 164. – С. 50-57.

130. **Berthiaux, H.** Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review [Text] / H. Berthiaux, V. Mizonov // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2004. – Т. 85. – № 6. – С. 1143-1168.

131. **Beitzel, I.** Assessment and classification of performance mixers [Text] / I. Beitzel // Materials and Structures. – 2003. – №5. – С. 250-264.

132. **Bowman, F.** Introduction to Bessel Functions [Text] / F. Bowman. – 2012. – 160 с.

133. **Chatterjee, S.** Regression Analysis by Example (5th Edition) [Text] / S. Chatterjee. – 2013. – 424 с.

134. **DIN 18555-9-1999.** Testing of mortars containing mineral binders [Text]. – Part 9: Hardened mortars; determination of the mortar compressive strength in the bed joint, 1999. – 8 с.

135. **DIN 52615-1-1973.** Testing of thermal insulations; determination of water vapour permeability of building and insulating materials, test procedure and evaluation of results [Text], 1973. – 6 с.

136. **Perschin, V.** Determination of mixture inclination to segregation [Text] / V. Perschin, S. Borischnikova, A. Pasko, Yu. Selivanow // Abstracts of papers World Congress on Particle Technology 3, Brighton, UK. – 1998. – 173 с.

137. **Dhawan, R.K.** A Textbook of Engineering Drawing [Text] / R.K. Dhawan. – 2012. – 688 с.

138. **Dury, C.M.,** Competition of mixing and segregation in rotating cylinders Tidsskrift [Text] / C.M. Dury, G.H. Ristow // Physics of fluids. – 1999. – Т. 11. – № 6. – С. 1387-1394.

139. **Goncalves, C.,** Materials for Construction and Civil Engineering [Text] / C.

Goncalves, Margarido F. – 2015. – 902 c.

140. **EN 998-1:2010**. Specification for mortar for masonry [Text]. Part 1: Rendering and plastering mortar. – 2010. – 25 c.

141. Experimental Study on Mechanics [Text] \ Behavior of Perlite Air-Entrained Concrete Material / DIC Method Proceedings of 2012 International Conference on Mechanical Engineering and Material Science -MEMS - 2012.

142. **Kresta, S.** Advances in Industrial Mixing: A Companion to the Handbook of Industrial Mixing [Text] / S. Kresta, A. Etchells, D. Dickey, V. Atiemo-Obeng. – 2015. – 1044 c.

143. **Lockwood, E.H.** A Book of Curves [Text] / E.H. Lockwood. Cambridge University Press. – 2009. – 212 c.

144. **Langhorn, K.** The Unexpected Rewards of Testing a Mixer [Text] / K. Langhorn // Chemical Engineering. July – 2012.

145. **Naumann, R.J.** Introduction to the Physics and Chemistry of Materials [Text] / R.J. Naumann. – 2008. – 572 c.

146. **Ostapenko, D.V.** Firm particles movement on horizontal sites of exhaust gas dust low power boilers [Text] / D.V. Ostapenko, A.V Lykianov, L.D. Katin. Modern industrial and civil construction. – 2009. – C. 146-150.

147. **Paul, E.** Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice [Text] / E. Paul, V. Atiemo-Obeng, S. Kresta. – 2003. – 1448 c.

148. **Shemetova, O.M.**, Pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube [Text] / O.M. Shemetova, Y.M. Fadin, V.P. Voronov, E.G. Shemetov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – T. 160 LNCE. – C. 333-339.

149. **Shemetova, O.M.**, Production of uniform fine mixtures in a pneumatic system [Text] / O.M. Shemetova, Y.M. Fadin, V.S. Bogdanov // Russian Engineering Research. – 2022. – T. 42. – № 5. – C. 520-522.

150. **Shemetova, O.M.**, Research Study of Mixing Processes in the Pneumatic Mixer for Dry Construction Mixes [Text] / O.M. Shemetova, Y.M. Fadin, V.P. Voronov, V.S. Bogdanov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2023. – T. 307 LNCE. – C. 243-525.

151. **Wang Duolin.** Research on sound absorption properties of expanded perlite material [Text] / Wang Duolin // Low Temperature Architecture Technology. – 2011. – T.33 – C. 13-14.



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B01F 5/00 (2021.02)

(21)(22) Заявка: 2020136892, 10.11.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.11.2020

Дата регистрации:
24.05.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 10.11.2020

(45) Опубликовано: 24.05.2021 Бюл. № 15

Адрес для переписки:

308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул.
Костюкова, 46, ФГБОУ ВО "Белгородский
государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова", отдел создания и оценки
объектов интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

**Фадин Юрий Михайлович (RU),
Воронов Виталий Павлович (RU),
Шеметова Ольга Михайловна (RU),
Шеметов Евгений Геннадьевич (RU),
Лазько Елизавета Владимировна (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: SU 980796 A1, 15.12.1982. Орехова
Татьяна Николаевна "Пневмосмеситель
непрерывного действия для производства
сухих строительных смесей". Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук, Белгород, 2013.

(54) ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЬ ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к промышленности строительных материалов, а именно к устройствам получения строительных смесей.

Полезная модель направлена на повышение качества готового продукта за счет увеличения степени однородности путем интенсификации процесса смешивания.

Это достигается тем, что пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергонесущей трубкой содержит корпус 1, в который входят загрузочные патрубки 6 для подачи материала и выгрузочный парубок 3 для

разгрузки готовой смеси. В предложенном решении в нижней части корпуса 1, перпендикулярно его оси, с помощью держателей 5 закреплена спиральная энергонесущая трубка 4 круглого сечения, имеющая по всей длине наружной поверхности равномерно, в шахматном порядке, относительно оси спиральной энергонесущей трубки 4 расположенные отверстия, при этом оси отверстий направлены вверх под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости спиральной энергонесущей трубки 4. 2 ил.

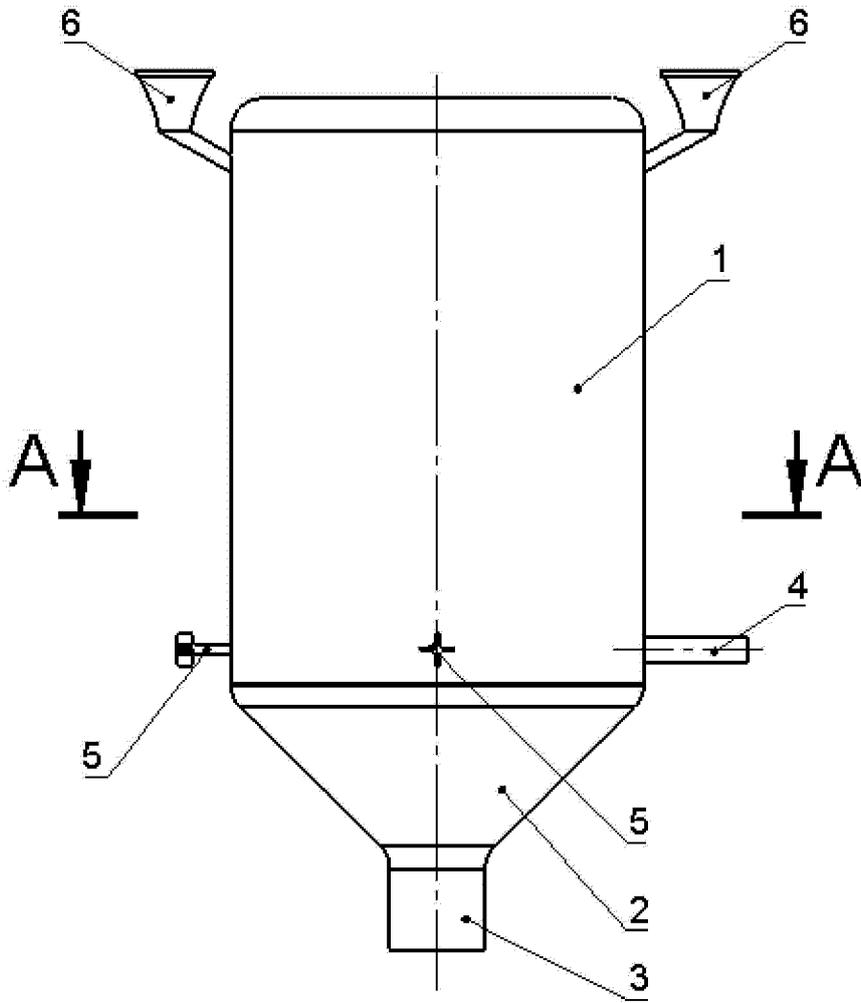


Fig. 1

Полезная модель относится к промышленности строительных материалов, а именно к устройствам получения строительных смесей.

Известна конструкция пневмосмесителя [Орехова Т.Н. Определение производительности пневмосмесителя сухих строительных смесей с учетом анализа устройств смесительных агрегатов //Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 65-68], содержащий пневмосмеситель непрерывного действия для производства сухих строительных смесей, позволяющий повысить степень гомогенизации смеси.

Недостатком этой конструкции является недостаточная степень перемешивания.

Известна конструкция пневмосмесителя [авторское свидетельство СССР на изобретение № 1761243, МПК – В 01 F 5/24; заявл. 10.01.1990; опубл. 15.09.1992, бюл. №34]. Пневмосмеситель сыпучих материалов содержит цилиндроконический корпус, патрубки ввода и вывода сыпучих материалов, соосно установленную внутри корпуса циркуляционную трубу, состоящую из двух отрезков, отражатель, расположенный над верхней частью циркуляционной трубы, газораспределительное устройство для ввода сжатого воздуха, размещенное в нижней части конической части корпуса под нижней частью циркуляционной трубы, патрубков ввода отработанного газа (воздуха), а также смесительное устройство, состоящее из шайбы и цилиндрического отражателя с расширенной нижней частью.

Недостатком этой конструкции является низкая эффективность перемешивания, обусловленная малым числом перемешиваемых потоков.

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа, является пневмосмеситель [авторское свидетельство СССР на изобретение № 980796, МПК - В 01 F 5/20; заявл. 11.11.1979; опубл. 15.12.1982, бюл. №46]. Пневмосмеситель состоит из вертикального корпуса с крышкой и конического днища. В корпусе соосно расположена обечайка, образующая у оснований кольцевые зазоры с крышкой и днищем. Для избежания пассивных зон кольцевые зазоры выполняются из условий неразрывности потока. У основания корпуса расположены под углом 30-45° к горизонтальной плоскости струйные элементы, выполненные в виде инжекторов. При этом диффузор каждого инжектора находится в полости обечайки, а загрузочная камера в полости корпуса. Загрузочная камера каждого инжектора снабжена шибером. В нижней части загрузочная камера имеет окно, обеспечивающее циркуляцию воздушно-порошковой смеси, поступающей снизу. К коническому днищу прикреплен выгрузочный патрубок, закрываемый с помощью пневмоцилиндра. В крышке установлен рукавный фильтр с импульсной продувкой, соединенный через улитку с выхлопной трубой. В крышке расположены загрузочные патрубки. Подвод сжатого воздуха для работы инжекторов осуществляется через вентиль. Включение пневмоцилиндра осуществляется четырехходовым краном. Обечайка фиксируется в корпусе с помощью ребер.

С существенными признаками заявленной полезной модели совпадает следующая совокупность признаков прототипа: корпус, соединенный с загрузочными патрубками для подачи материала и выгрузочным парубком для выхода готового материала.

Недостатком прототипа является невысокое качество готового продукта, связанное с его неоднородностью из-за возникновения пассивных зон в пространстве между соседними парами инжекторов.

Полезная модель направлена на повышение качества готового продукта за счет увеличения степени однородности путем интенсификации процесса смешивания.

Это достигается тем, что пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергонесущей трубкой содержит корпус, в который входят загрузочные патрубки для подачи материала и выгрузочный парубок для разгрузки готовой смеси. В предложенном

решении в нижней части корпуса, перпендикулярно его оси, с помощью держателей закреплена спиральная энергонесущая трубка круглого сечения, имеющая по всей длине наружной поверхности равномерно, в шахматном порядке, относительно оси спиральной энергонесущей трубки расположенные отверстия, при этом оси отверстий
5 направлены вверх под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости спиральной энергонесущей трубки.

Наличие отличительных конструктивных признаков полезной модели позволяет создать режим хаотично-вихревого движения энергоносителя с материалом за счет тангенциально-составляющих скоростей потока, что обеспечивает интенсивное
10 смешивание материалов и ведет к увеличению степени однородности и соответственно к повышению качества готового продукта.

Сущность полезной модели поясняется графическим материалом, где на фиг. 1 изображен пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергонесущей трубкой; на фиг. 2 - разрез корпуса (разрез А-А на фиг. 1).

Пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергонесущей трубкой состоит из корпуса 1, выполненного в виде полого цилиндра, ось которого расположена вертикально, и закрытого сверху. В нижней части корпуса 1 закреплено, например, сваркой, коническое днище 2. К коническому днищу 2 прикреплен, например, сваркой выгрузочный патрубок 3. Внутри пневмосмесителя для сыпучих материалов со
15 спиральной энергонесущей трубкой, в нижней части корпуса 1, перпендикулярно его оси, располагается спиральная энергонесущая трубка 4 круглого сечения с отверстиями. Отверстия расположены равномерно, в шахматном порядке, с шагом между ними, например, 90 мм, и оси отверстий направлены вверх под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости спиральной энергонесущей трубки 4. Приведенные значения
20 параметров являются оптимальными, которые определены при проведении экспериментов. Зафиксирована спиральная энергонесущая трубка 4 при помощи держателей 5 с трех сторон. В верхней части корпуса 1 располагаются два загрузочных патрубков 6 для подачи материала. Загрузочные патрубки 6 расположены симметрично с двух сторон цилиндрического корпуса 1.

30 Принцип действия пневмосмесителя для сыпучих материалов со спиральной энергонесущей трубкой основывается на перемешивании сухих строительных смесей в воздушно-вихревом потоке.

Компоненты для перемешивания, подаются в корпус 1 пневмосмесителя для сыпучих материалов со спиральной энергонесущей трубкой через загрузочные патрубки 6. В
35 корпусе 1 материал подхватывается энергоносителем, например, сжатым воздухом, подающимся одновременно с материалом и истекающим из отверстий в спиральной энергонесущей трубке 4, которая закреплена при помощи держателей 5. Так как отверстия спиральной энергонесущей трубки 4 расположены равномерно, в шахматном порядке, и оси отверстий направлены вверх под углом 30-35° относительно вертикальной
40 плоскости спиральной энергонесущей трубки 4, в корпусе 1 создается хаотично-вихревой поток воздуха, за счет чего происходит интенсивное перемешивание компонентов. В коническом днище 2 создается разряжение, и после цикла перемешивания готовая смесь выходит через выгрузочный патрубок 3 в осадительное устройство (на рисунке не показано).

45 Такое решение способствует повышению степени однородности готового продукта за счет интенсификации процесса смешивания, что дает возможность повысить качество и получать сухие смеси с высокой степенью распределения ключевого компонента.

(57) Формула полезной модели

Пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергонесущей трубкой, содержащий корпус, соединенный с загрузочными патрубками для подачи материала и выгрузочным парубком для выхода готового продукта, отличающийся тем, что в нижней части корпуса, перпендикулярно его оси, с помощью держателей закреплена спиральная энергонесущая трубка круглого сечения, имеющая по всей длине наружной поверхности равномерно, в шахматном порядке, относительно оси спиральной энергонесущей трубки расположенные отверстия, при этом оси отверстий направлены вверх под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости спиральной энергонесущей трубки.

15

20

25

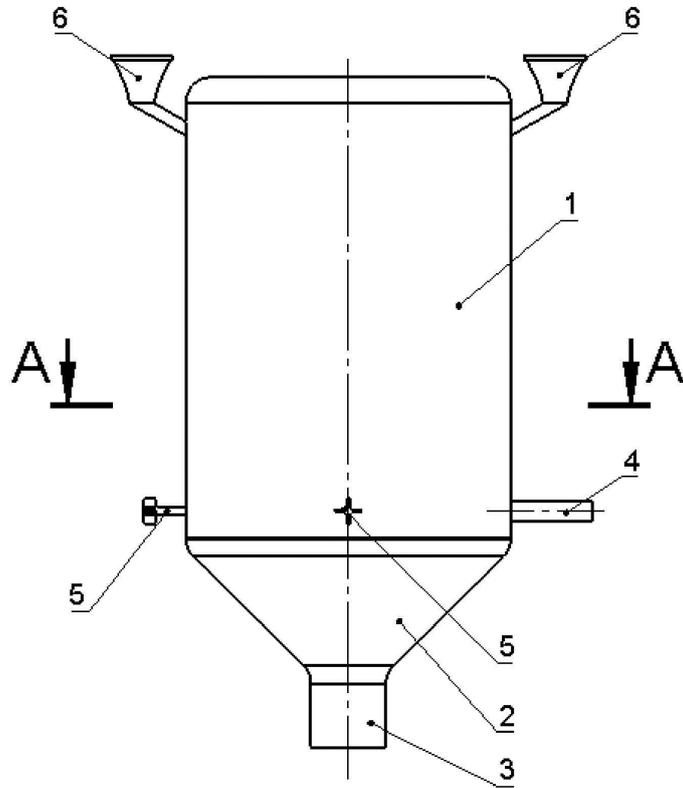
30

35

40

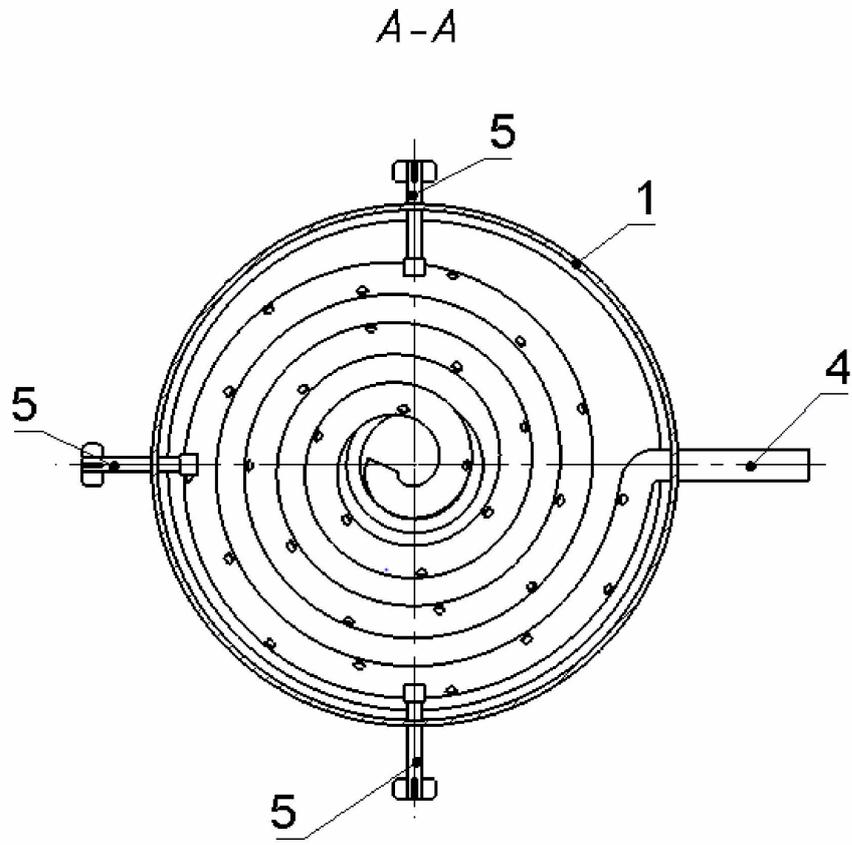
45

1



Фиг.1

2



Фиг. 2



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B01F 25/00 (2022.01); *B01F 33/40* (2022.01)

(21)(22) Заявка: 2021134315, 24.11.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.11.2021

Дата регистрации:
13.05.2022

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.11.2021

(45) Опубликовано: 13.05.2022 Бюл. № 14

Адрес для переписки:

308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул.
Костюкова, 46, Белгородский ГТУ, отдел
создания и оценки объектов интеллектуальной
собственности

(72) Автор(ы):

**Федин Юрий Михайлович (RU),
Шеметова Ольга Михайловна (RU),
Шеметов Евгений Геннадьевич (RU),
Латышев Сергей Сергеевич (RU),
Богданов Василий Степанович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г.
Шухова" (RU)**

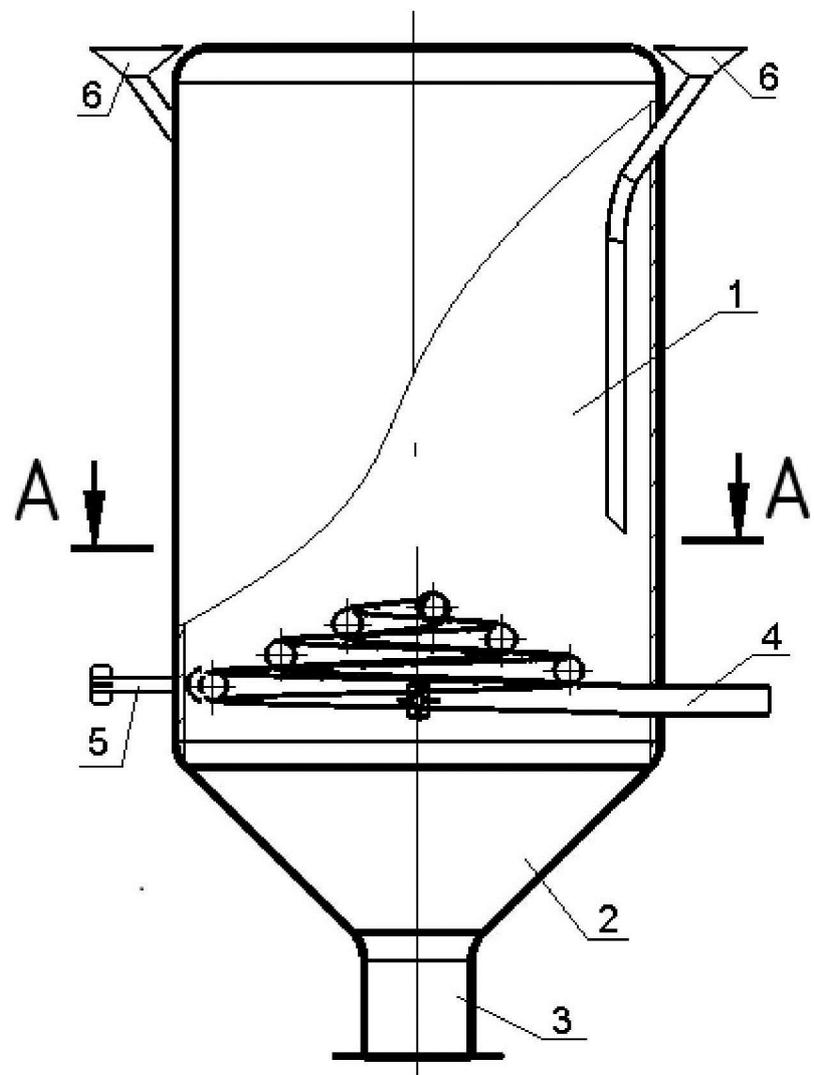
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 204403 U1, 24.05.2021. SU 1761243
A1, 15.09.1992. SU 980796 A1, 15.12.1982. SU
882575 A1, 23.11.1981. US 4128343 A1, 05.12.1978.
US 2723838 A1, 15.11.1955.

(54) ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЬ ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к промышленности строительных материалов, а именно к устройствам для получения строительных смесей. Полезная модель направлена на повышение качества готового продукта за счет увеличения степени однородности путем интенсификации процесса смешивания. Это достигается тем, что пневмосмеситель для мелкодисперсных сыпучих материалов состоит из корпуса 1, выполненного в виде полого цилиндра, ось которого расположена вертикально, и закрытого сверху. В нижней части корпуса 1 закреплено, например, сваркой, коническое днище 2. К коническому днищу 2 прикреплен, например, сваркой

выгрузочный патрубок 3. Внутри пневмосмесителя для сыпучих материалов, в нижней части корпуса 1, перпендикулярно его оси, располагается спиральная энергонесущая трубка 4 круглого сечения с отверстиями и вытянутая вверх в виде усеченного конуса, соосного с осью корпуса. Отверстия расположены равномерно, в шахматном порядке, с шагом между ними, например, 90 мм, и оси отверстий направлены вверх под углом (30-35)° относительно вертикальной плоскости спиральной энергонесущей трубки 4. Зафиксирована спиральная энергонесущая трубка 4 при помощи держателей 5 с трех сторон. 2 ил.



Фиг.1

Полезная модель относится к промышленности строительных материалов, а именно к устройствам для получения строительных смесей.

Известна конструкция пневмосмесителя [Орехова Т.Н. Определение производительности пневмосмесителя сухих строительных смесей с учетом анализа устройств смесительных агрегатов //Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 65-68], содержащая пневмосмеситель непрерывного действия для производства сухих строительных смесей, позволяющий повысить степень гомогенизации смеси.

Недостатком этой конструкции является недостаточная степень перемешивания.

Известна конструкция пневмосмесителя [авторское свидетельство СССР на изобретение № 1761243, МПК – В 01 F 5/24; заявл. 10.01.1990; опубл. 15.09.1992, бюл. №34]. Пневмосмеситель сыпучих материалов содержит цилиндроконический корпус, патрубки ввода и вывода сыпучих материалов, соосно установленную внутри корпуса циркуляционную трубу, состоящую из двух отрезков, отражатель, расположенный над верхней частью циркуляционной трубы, газораспределительное устройство для ввода сжатого воздуха, размещенное в нижней части конической части корпуса под нижней частью циркуляционной трубы, патрубков ввода отработанного газа (воздуха), а также смесительное устройство, состоящее из шайбы и цилиндрического отражателя с расширенной нижней частью.

Недостатком этой конструкции является низкая эффективность перемешивания, обусловленная малым числом перемешиваемых потоков.

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа, является пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергоносущей трубкой [патент на полезную модель № RU 204403 U1, МПК – В 01 F 5/00; заявл. 10.11.2020; опубл. 24.05.2021, бюл. №15]. Пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергоносущей трубкой состоит из корпуса, выполненного в виде полого цилиндра, ось которого расположена вертикально, и закрытого сверху. В нижней части корпуса закреплено, например, сваркой, коническое днище. К коническому днищу прикреплено, например, сваркой, выгрузочный патрубок. Внутри пневмосмесителя для сыпучих материалов со спиральной энергоносущей трубкой, в нижней части корпуса, перпендикулярно его оси, располагается спиральная энергоносущая трубка круглого сечения с отверстиями. Отверстия расположены равномерно, в шахматном порядке, с шагом между ними, например, 90 мм, и оси отверстий направлены вверх под углом (30-35)° относительно вертикальной плоскости спиральной энергоносущей трубки.

С существенными признаками заявленной полезной модели совпадает следующая совокупность признаков прототипа: корпус, соединенный с коническим днищем, который соединен с выгрузочным патрубком для выхода материала, внутри корпуса располагается спиральная энергоносущая трубка круглого сечения для подачи энергоносителя с отверстиями, направленными вверх под углом (30-35)° относительно вертикальной плоскости, держатели, фиксирующие спиральную энергоносущую трубку с корпусом, и загрузочные патрубки для подачи материала соединенные с корпусом.

Недостатком прототипа является невысокое качество готовой смеси, что связано с низкой степенью однородности готового продукта из-за недостаточного воздействия энергоносителя в корпусе смешения, на перемешиваемый материал.

Полезная модель направлена на повышение качества готового продукта за счет увеличения степени однородности путем интенсификации процесса смешивания.

Это достигается тем, что пневмосмеситель для мелкодисперсных сыпучих материалов содержит корпус, связанный с коническим днищем и соединенный с выгрузочным патрубком для выхода материала. Внутри корпуса располагается спиральная

энергонесущая трубка круглого сечения, имеющая по всей длине наружной поверхности равномерно, в шахматном порядке, относительно оси спиральной энергонесущей трубки расположенные отверстия, при этом оси отверстий направлены вверх под углом (30-35)° относительно вертикальной плоскости, держатели, фиксирующие спиральную энергонесущую трубку с корпусом, и загрузочные патрубки для подачи материала, соединенные с корпусом. В предложенном решении спиральная энергонесущая трубка вытянута вверх в виде усеченного конуса, соосно с корпусом, при этом большее основание конусной спирали закреплено в нижней части корпуса, а меньшее направлено вверх.

Наличие отличительных конструктивных признаков полезной модели позволяет увеличить площадь взаимодействия энергоносителя с компонентами перемешивания в корпусе смесителя во время смешивания материала, что обеспечивает повышение качества готового продукта за счет интенсификации процесса смешивания.

Сущность пневмосмесителя для мелкодисперсных сыпучих материалов поясняется графическим материалом, где на фиг. 1 изображен пневмосмеситель для мелкодисперсных сыпучих материалов, фиг. 2 – разрез корпуса (разрез А-А на фиг. 1).

Пневмосмеситель для мелкодисперсных сыпучих материалов состоит из корпуса 1, выполненного в виде полого цилиндра, ось которого расположена вертикально, и закрытого сверху. В нижней части корпуса 1 закреплено, например, сваркой, коническое днище 2. К коническому днищу 2 прикреплен, например, сваркой выгрузочный патрубок 3. Внутри пневмосмесителя для сыпучих материалов, в нижней части корпуса 1, перпендикулярно его оси, располагается спиральная энергонесущая трубка 4 круглого сечения с отверстиями и вытянута вверх в виде усеченного конуса, соосно с осью корпуса. Отверстия расположены равномерно, в шахматном порядке, с шагом между ними, например, 90 мм, и оси отверстий направлены вверх под углом (30-35)° относительно вертикальной плоскости спиральной энергонесущей трубки 4. Зафиксирована спиральная энергонесущая трубка 4 при помощи держателей 5 с трех сторон.

Принцип действия пневмосмесителя для мелкодисперсных сыпучих материалов основывается на перемешивании сухих строительных смесей в воздушно-вихревом потоке.

Компоненты для перемешивания, например, цемент и вермикулит, подаются в корпус 1 пневмосмесителя для мелкодисперсных сыпучих материалов через загрузочные патрубки 6. В корпусе 1 материал подхватывается энергоносителем, например, сжатым воздухом, подающимся одновременно с материалом и истекающим из отверстий в спиральной энергонесущей трубке 4 вытянутой вверх в виде усеченного конуса, которая закреплена при помощи держателей 5. Отверстия в спиральной энергонесущей трубке 4 расположены равномерно, в шахматном порядке, и оси отверстий направлены вверх под углом (30-35)° относительно вертикальной плоскости спиральной энергонесущей трубки 4. За счет вытягивания спиральной энергонесущей трубки 4 конусом вверх увеличивается площадь взаимодействия энергоносителя с компонентами перемешивания в корпусе 1 смесителя перемешивания, что обеспечивает повышение качества готового продукта за счет интенсификации процесса смешивания. В коническом днище 2 создается разрежение, и после цикла перемешивания, готовая смесь выходит через выгрузочный патрубок 3 в осадительное устройство (на рисунке не показано).

Такое решение способствует повышению степени однородности готового продукта за счет интенсификации процесса смешивания, что дает возможность повысить качество и получать сухие смеси с высокой степенью распределения ключевого компонента.

(57) Формула полезной модели

Пневмосмеситель для мелкодисперсных сыпучих материалов, содержащий корпус, связанный с коническим днищем и соединенный с выгрузочным патрубком для выхода
5 материала, внутри корпуса располагается спиральная энергонесущая трубка круглого сечения, имеющая по всей длине наружной поверхности равномерно, в шахматном порядке, относительно оси спиральной энергонесущей трубки расположенные отверстия, при этом оси отверстий направлены вверх под углом $(30-35)^\circ$ относительно вертикальной плоскости, держатели, фиксирующие спиральную энергонесущую трубку с корпусом,
10 и загрузочные патрубки для подачи материала, соединенные с корпусом, отличающийся тем, что спиральная энергонесущая трубка вытянута вверх в виде усеченного конуса, соосно с корпусом, при этом большее основание конусной спирали закреплено в нижней части корпуса, а меньшее направлено вверх.

15

20

25

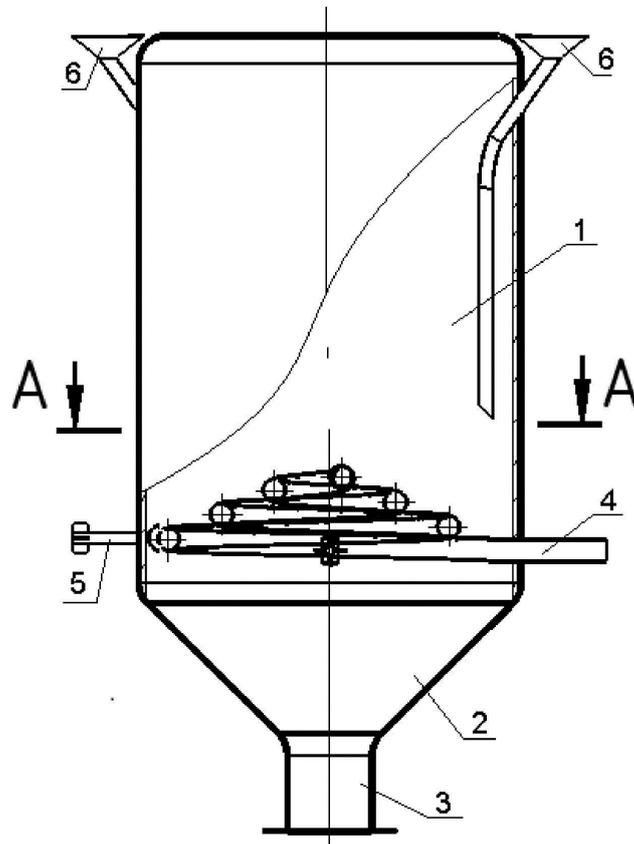
30

35

40

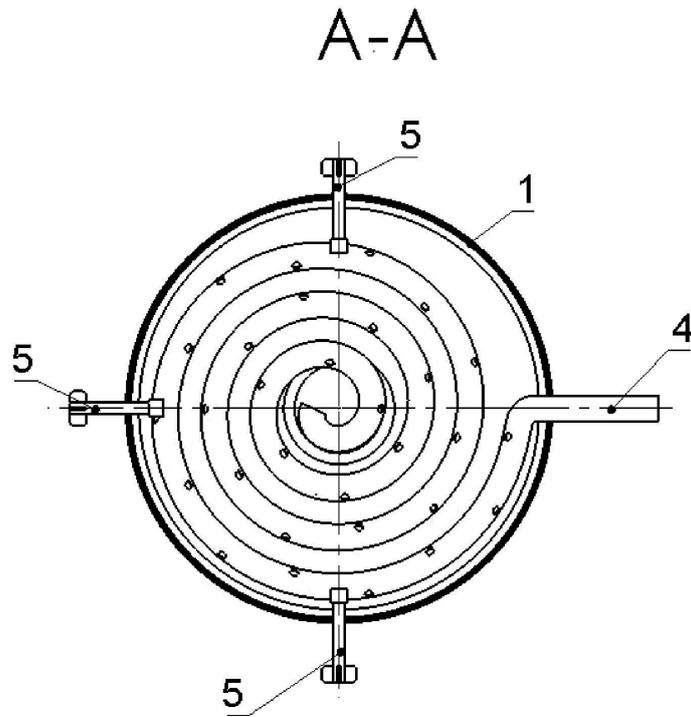
45

1



Фиг.1

2



Фиг.2



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

B01F 23/60 (2022.08); *B01F 25/10* (2022.08); *B01F 33/40* (2022.08)

(21)(22) Заявка: 2022119114, 13.07.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
13.07.2022Дата регистрации:
14.10.2022

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 13.07.2022

(45) Опубликовано: 14.10.2022 Бюл. № 29

Адрес для переписки:

308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул.
Костюкова, 46, ФГБОУ ВО "БелГГТУ", отдел
создания и оценки объектов интеллектуальной
собственности

(72) Автор(ы):

**Фадин Юрий Михайлович (RU),
Шеметова Ольга Михайловна (RU),
Шеметов Евгений Геннадьевич (RU),
Загороднюк Лилия Хасановна (RU),
Аль Мамури Саад Кхалил Шахид (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

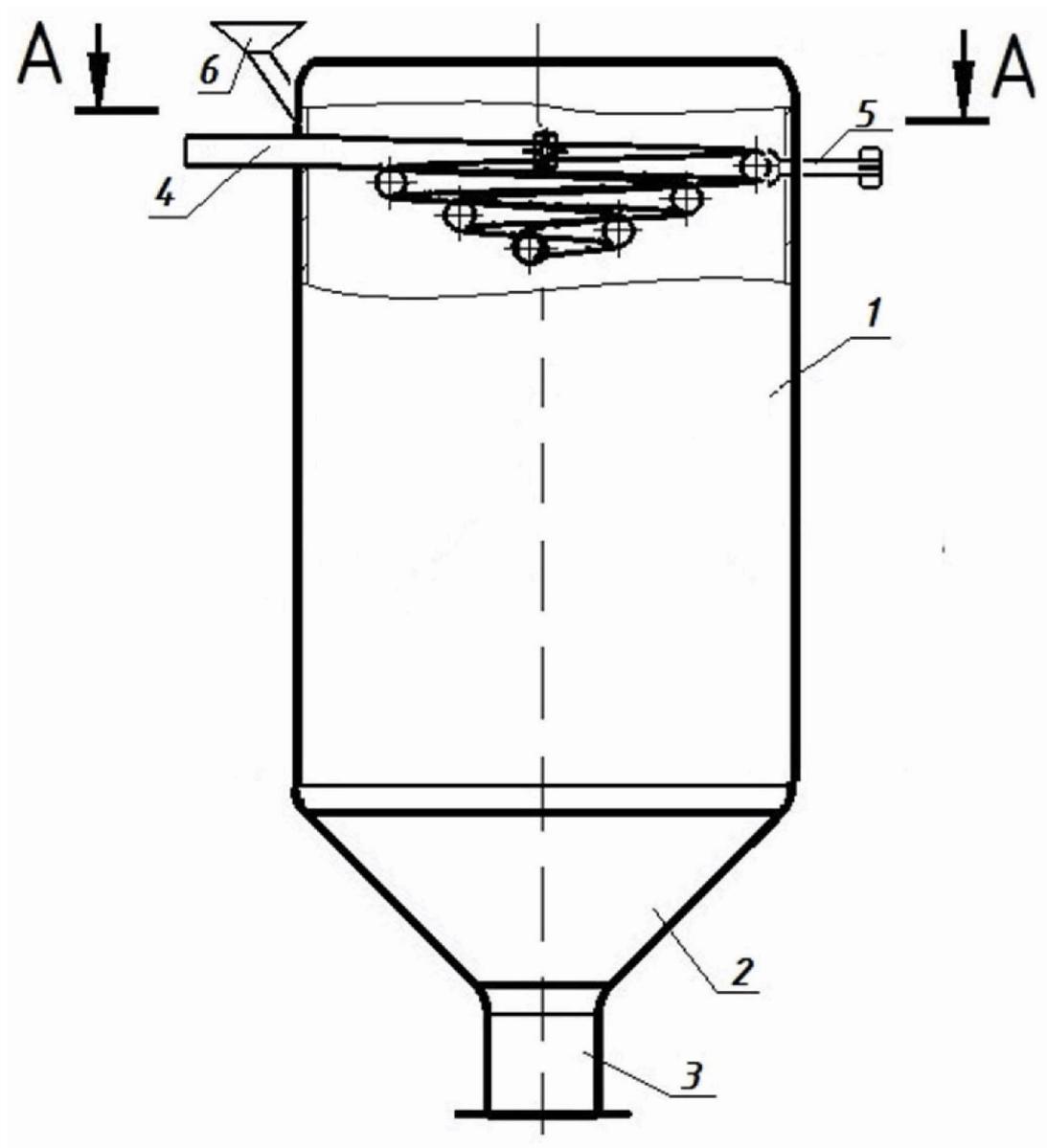
**федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г.
Шухова" (RU)**(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 204403 U1, 24.05.2021. SU 1761243
A1, 15.09.1992. SU 1194472 A1, 30.11.1985. SU
1344708 A1, 15.10.1987. SU 980796 A1, 15.12.1982.
US 2723838 A1, 15.11.1955. US 4128343 A1,
05.12.1978.

(54) ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЬ ДЛЯ СУХИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к промышленности строительных материалов, а именно к устройствам для получения строительных смесей. Полезная модель направлена на повышение качества готового продукта за счет увеличения степени однородности путем интенсификации процесса смешивания и равномерному распределению перемешиваемого материала по камере смешения за счет снижения избыточного давления в камере смешения. Это достигается тем, что пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов содержит корпус, связанный с коническим днищем и соединенный с выгрузочным патрубком для выхода материала. Внутри корпуса

располагается спиральная энергонесущая трубка круглого сечения, имеющая по всей длине наружной поверхности равномерно, в шахматном порядке, относительно оси спиральной энергонесущей трубки расположенные отверстия, при этом оси отверстий направлены вниз под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости, держатели, фиксирующие спиральную энергонесущую трубку с корпусом, и загрузочные патрубки для подачи материала, соединенные с корпусом. В предложенном решении спиральная энергонесущая трубка жестко закреплена в верхней части корпуса и имеет форму конусной спирали, соосно вытянутой по оси корпуса вертикально вниз на высоту 1/4 корпуса. 2 ил.



Фиг.1

Полезная модель относится к промышленности строительных материалов, а именно, к устройствам для получения строительных смесей.

Известна конструкция пневмосмесителя [Орехова Т.Н. Определение производительности пневмосмесителя сухих строительных смесей с учетом анализа устройств смесительных агрегатов //Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 65-68], содержащая пневмосмеситель непрерывного действия для производства сухих строительных смесей, позволяющий повысить степень гомогенизации смеси.

Недостатком этой конструкции является недостаточная однородность готового продукта.

Известна конструкция пневмосмесителя [авторское свидетельство СССР на изобретение № 1761243, МПК – В 01 F 5/24; заявл. 10.01.1990; опубл. 15.09.1992, бюл. №34]. Пневмосмеситель сыпучих материалов содержит цилиндроконический корпус, патрубки ввода и вывода сыпучих материалов, соосно установленную внутри корпуса циркуляционную трубу, состоящую из двух отрезков, отражатель, расположенный над верхней частью циркуляционной трубы, газораспределительное устройство для ввода сжатого воздуха, размещенное в нижней части конической части корпуса под нижней частью циркуляционной трубы, патрубков ввода отработанного газа (воздуха), а также смесительное устройство, состоящее из шайбы и цилиндрического отражателя с расширенной нижней частью.

Недостатком этой конструкции является низкая эффективность перемешивания, обусловленная малым числом перемешиваемых потоков.

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа, является пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергоносущей трубкой [патент на полезную модель № RU 204403 U1, МПК – В 01 F 5/00; заявл. 10.11.2020; опубл. 24.05.2021, бюл. №15]. Пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергоносущей трубкой состоит из корпуса, выполненного в виде полого цилиндра, ось которого расположена вертикально, и закрытого сверху. В нижней части корпуса закреплено, например, сваркой, коническое днище. К коническому днищу прикреплен, например, сваркой, выгрузочный патрубок. Внутри пневмосмесителя для сыпучих материалов со спиральной энергоносущей трубкой, в нижней части корпуса, перпендикулярно его оси, располагается спиральная энергоносущая трубка круглого сечения с отверстиями. Отверстия расположены равномерно, в шахматном порядке, с шагом между ними, например, 90 мм, и оси отверстий направлены вверх под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости спиральной энергоносущей трубки.

С существенными признаками заявленной полезной модели совпадает следующая совокупность признаков прототипа: корпус, соединенный с коническим днищем, который соединен с выгрузочным патрубком для выхода материала, внутри корпуса располагается спиральная энергоносущая трубка круглого сечения для подачи энергоносителя с отверстиями, направленными вверх под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости, держатели, фиксирующие спиральную энергоносущую трубку с корпусом и загрузочные патрубки для подачи материала, соединенные с корпусом.

Недостатком прототипа является невысокое качество готовой смеси, что связано с низкой степенью однородности готового продукта из-за недостаточного воздействия энергоносителя в корпусе смешения, на перемешиваемый материал и наличие избыточного давления в камере смешения, что препятствует равномерному распределению материала по камере.

Полезная модель направлена на повышение качества готового продукта за счет увеличения степени однородности путем интенсификации процесса смешивания и

равномерному распределению перемешиваемого материала по камере смешения за счет снижения избыточного давления в камере смешения.

Это достигается тем, что пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов содержит корпус, связанный с коническим днищем и соединенный с выгрузочным патрубком для выхода материала. Внутри корпуса располагается спиральная энергонесущая трубка круглого сечения, имеющая по всей длине наружной поверхности равномерно, в шахматном порядке, относительно оси спиральной энергонесущей трубки расположенные отверстия, при этом оси отверстий направлены вниз под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости, держатели, фиксирующие спиральную энергонесущую трубку с корпусом и загрузочные патрубки для подачи материала, соединенные с корпусом. В предложенном решении спиральная энергонесущая трубка жестко закреплена в верхней части корпуса и имеет форму конусной спирали, соосно вытянутой по оси корпуса вертикально вниз на высоту 1/4 корпуса.

Наличие отличительных конструктивных признаков полезной модели позволяет увеличить площадь взаимодействия энергоносителя с компонентами перемешивания в корпусе смесителя во время смешивания материала, что обеспечивает повышение качества готового продукта за счет интенсификации процесса смешивания. Кроме того, существенно снижается избыточное давление, что позволяет равномерно распределяться материалу по камере смешения, за счёт чего происходит более равномерное перемешивание материала. Приведенные значения параметров являются оптимальными и были определены по результатам проведенных экспериментов.

Сущность пневмосмесителя для сухих сыпучих материалов поясняется графическим материалом, где на фиг. 1 изображен пневмосмеситель для сыпучих материалов, фиг. 2 - разрез корпуса (разрез А-А на фиг. 1).

Пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов состоит из корпуса 1, выполненного в виде полого цилиндра, ось которого расположена вертикально, и закрытого сверху. В нижней части корпуса 1 закреплено, например, сваркой, коническое днище 2. К коническому днищу 2 прикреплен, например, сваркой выгрузочный патрубок 3. Внутри пневмосмесителя для сыпучих материалов, в верхней части корпуса 1, перпендикулярно его оси, располагается спиральная энергонесущая трубка 4 круглого сечения с отверстиями и вытянута вниз в виде усеченного конуса соосного с осью корпуса. Отверстия расположены равномерно, в шахматном порядке, с шагом между ними, например, 90 мм, и оси отверстий направлены вверх под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости спиральной энергонесущей трубки 4. Зафиксирована спиральная энергонесущая трубка 4 при помощи держателей 5 с трех сторон. Компоненты для перемешивания, подаются через загрузочный патрубок 6.

Принцип действия пневмосмесителя для сухих сыпучих материалов основывается на перемешивании сухих строительных смесей в воздушно-вихревом потоке.

Компоненты для перемешивания, например, цемент и вермикулит, подаются в корпус 1 пневмосмесителя для сыпучих материалов через загрузочный патрубок 6. В корпусе 1 материал подхватывается энергоносителем, например, сжатым воздухом, подающимся одновременно с материалом и истекающим из отверстий в спиральной энергонесущей трубке 4, вытянутой вниз в виде усеченного конуса, которая закреплена при помощи держателей 5. Отверстия в спиральной энергонесущей трубке 4 расположены равномерно, в шахматном порядке, и оси отверстий направлены вниз под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости спиральной энергонесущей трубки 4. За счет вытягивания спиральной энергонесущей трубки 4 в виде усеченного конуса, направленного вниз соосно с корпусом, увеличивается площадь взаимодействия

энергоносителя с компонентами перемешивания в корпусе 1 смесителя. Что обеспечивает повышение качества готового продукта за счет интенсификации процесса смешивания, а также существенно снижается избыточное давление и позволяет равномерно распределяться материалу по камере смешения, за счёт чего происходит более
5 равномерное перемешивание материала. В коническом днище 2 создается разрежение, и после цикла перемешивания, готовая смесь выходит через выгрузочный патрубок 3 в осадительное устройство (на рисунке не показано).

Такое решение способствует повышению степени однородности готового продукта за счет интенсификации процесса смешивания, что дает возможность повысить качество
10 и получать сухие смеси с высокой степенью распределения ключевого компонента и позволяет более равномерно распределяться материалу, за счет снижения избыточного давления.

(57) Формула полезной модели

15 Пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов, содержащий корпус, связанный с коническим днищем и соединенный с выгрузочным патрубком для выхода материала, внутри корпуса располагается спиральная энергонесущая трубка круглого сечения, имеющая по всей длине наружной поверхности равномерно, в шахматном порядке,
относительно оси спиральной энергонесущей трубки расположенные отверстия, при
20 этом оси отверстий направлены вверх под углом 30-35° относительно вертикальной плоскости, держатели, фиксирующие спиральную энергонесущую трубку с корпусом, и загрузочные патрубки для подачи материала, соединенные с корпусом, отличающийся тем, что спиральная энергонесущая трубка жестко закреплена в верхней части корпуса и имеет форму конусной спирали соосно вытянутой по оси корпуса вертикально вниз
25 на высоту 1/4 корпуса.

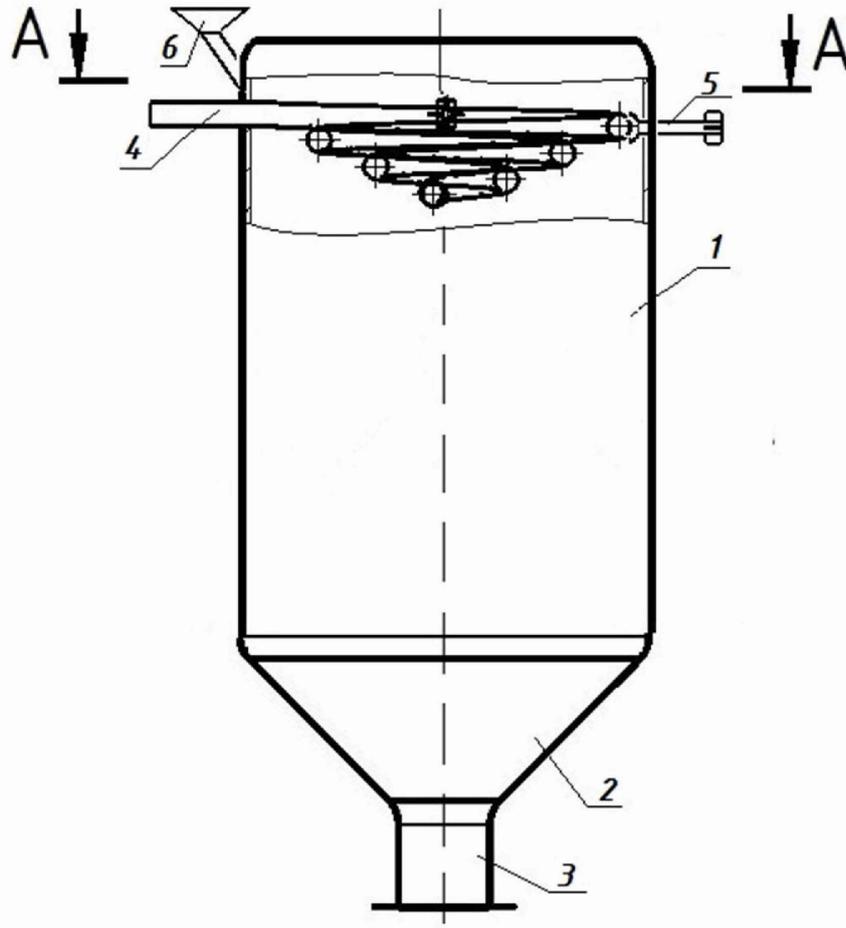
30

35

40

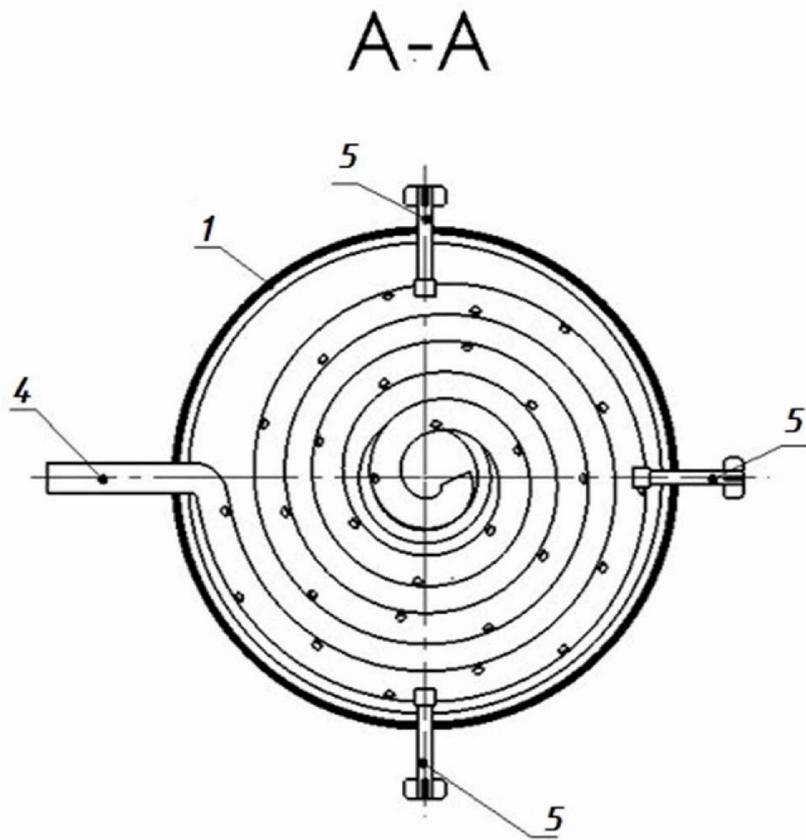
45

1



Фиг.1

2



Фиг.2

Утверждаю
Генеральный директор
АО "АПК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ"
Г.В. Богданов
«_____» _____ 2022 г.



АКТ

о внедрении пневмосмесителя со спиральной энергонесущей трубкой для производства сухих строительных смесей

составлен настоящий акт о том, что на АО "АПК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ" при непосредственном участии аспиранта кафедры МО Шеметовой Ольги Михайловны был разработан, изготовлен и испытан пневмосмеситель со спиральной энергонесущей трубкой со следующими техническими характеристиками:

1. Давление энергоносителя, кПа.....100-200
2. Размер частиц исходного материала, мм... $\leq 1,5$
3. Производительность, кг/ч..... ≤ 50
4. Габаритные размеры камеры смешения
 - длина, м.....0,260
 - ширина, м.....0,260
 - высота, м.....0,370
5. Габаритные размеры установки
 - длина, м.....0,700
 - ширина, м.....0,500
 - высота, м.....0,910
6. Масса, кг.....10

В результате испытаний пневмосмесителя были получены образцы теплоизоляционного материала, технические характеристики которой определялись стандартными методиками.

Анализ гранулометрического состава готовой смеси показал, что при смешении в хаотично-вихревом движении энергоносителя с материалом за счет тангенциально-составляющих скоростей потока, обеспечивается интенсивное смешивание материалов, что ведет к увеличению степени однородности и соответственно к повышению качества готового продукта.

По результатам промышленной апробации, теоретическим и экспериментальным исследованиям предлагаемая конструкция пневмосмесителя рекомендована для разработки опытно-промышленного образца и внедрения в производство.

от АО "АПК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ"

Технический директор



Богданов В.Н.

от БГТУ им. В.Г. Шухова:

к.т.н., проф. каф. МО

A handwritten signature in blue ink, consisting of several stylized, overlapping strokes.

Федин Ю.М.

Аспирантка каф. МО

Шеметова О.М.

Утверждаю
Генеральный директор
АО "АППК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ"
Г.В. Богданов
« _____ » _____ 2022 г.



ВЫПИСКА

из протокола технического совещания АО "АППК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ" от 29.06.2022 г.

Повестка совещания: об итогах испытаний пневмосмесителя со спиральной энергонесущей трубкой в условиях производства на АО "АППК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ".

Слушали: от разработчика технической документации аспиранта БГТУ им В.Г. Шухова Шеметову О.М.; от АО "АППК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ" – технического директора Богданова В.Н.

Установлено:

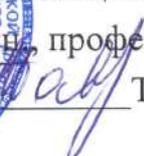
1. Пневмосмеситель показал эффективность, устойчивую работоспособность и высокую надежность в эксплуатации.
2. В ходе лабораторных испытаний в условиях производства на АО "АППК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ" по смешению теплоизоляционных материалов, в состав которых вошли портландцемент марки ПЦ М500 Д0, вспученный вермикулит, кварцевый песок фракции 0,1-0,5 мм.
3. Теплоизоляционный материал имеет следующие показатели: прочность при сжатии в 28-ми суточном возрасте - 3 МПа, коэффициент однородности составил менее 5%, плотность 1170 кг/м³.
4. Полученный состав смеси отвечает всем необходимым требованиям.

Постановили: результаты испытаний смешения теплоизоляционного материала в предлагаемом устройстве позволяют рекомендовать пневмосмеситель со спиральной энергонесущей трубкой для проектирования и изготовления в виде опытно-промышленного образца.

Технический директор
АО "АППК "БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ"

Богданов В.Н.



Утверждаю
проректор по научной
и инновационной деятельности,
д.т.н., профессор

Т.М. Давыденко

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Комиссия в составе заместителя заведующего кафедрой «Механическое оборудование», д.т.н., профессора Богданова В.С., к.т.н., профессора Фадины Ю.М., аспирантки Шеметовой О.М. составила настоящий акт о том, что на кафедре «Механическое оборудование» разработана и внедрена методика расчета конструктивно-технологических параметров пневмосмесителя со спиральной энергонесущей трубкой, который может использоваться на практических занятиях для закрепления материала в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 15.03.02-21-Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов и специалистов по направлению подготовки 15.05.01-24 Проектирование технологических машин и комплексов по дисциплинам «Технологические комплексы предприятий для производства вяжущих материалов и изделий на их базе» и «Механическое оборудование (общий курс)»

Заведующего кафедрой МО,
д.т.н., профессор

Богданов В.С.

Профессор кафедры МО
к.т.н., профессор

Фадина Ю.М.

Аспирант кафедры МО

Шеметова О.М.

УТВЕРЖДАЮ
ООО «Стройтехнология»
 А.В. Свиначев
 «26» 01 2024

Акт
о выпуске полупромышленной партии теплоизоляционной смеси
«Теплоизоляционная смесь с использованием вермикулита»

Мы, нижеподписавшиеся, представители ООО «Стройтехнологии»: начальник цеха Апанасенко А.Н., начальник лаборатории Агаркова Ю.С. и представители БГТУ им. В.Г. Шухова: ведущий научный сотрудник Фадин Ю.М., исполнитель Шеметова О.М. составили настоящий акт в том, что с 19 января 2024 г. по 26 января 2024 г. на предприятии были выпущены полупромышленные партии теплоизоляционных смесей в объеме по 100 кг и испытаны в соответствии с требованиями ГОСТ 31357-2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия». Смеси приготавливались в пневматических смесителях с различными конструктивными решениями с использованием специальной спиральной трубки, создающей оптимальные условия для смешения сырьевых материалов с различными физико-механическими свойствами, и без дополнительной спиральной трубки.

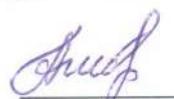
Результаты испытаний полученной теплоизоляционной смеси с использованием вермикулита показали следующие характеристики:

Характеристики	Смеситель пневматический	Смеситель ПССЭТ
Коэффициент паропроницаемости, мг/м·ч·Па	0,09	0,07
Усадка покрытия	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют
Средняя прочность при сжатии, МПа	4,9	3
Коэффициент теплопроводности, Вт/м*С	0,15	0,085
Плотность кг/м ³	1445	1170

Начальник цеха

 А.Н. Апанасенко

Начальник лаборатории

 Ю.С. Агаркова

Ведущий научный сотрудник

 Ю.М. Фадин

Исполнитель

 О.М. Шеметова

**Расчет экономической эффективности предлагаемой
конструкции пневматического смесителя**

Расчет затрат на НИР

В данной работе проводятся расчеты на капитальные вложения, предпроизводственные и другие затраты, обусловленные НИР.

Капитальные вложения, обусловленные выполнением НИР, определяются по формуле:

$$K_{\text{НИР}} = C_{\text{НИР}} + K_{\text{НИР}}, \quad 5.1$$

где $C_{\text{НИР}}$ - предпроизводственные (текущие) затраты на выполнение НИР, руб; $K_{\text{НИР}}$ - затраты, обусловленные применением определенных материально-технических, трудовых и финансовых ресурсов, в том числе и капитальных вложений, руб.

Предпроизводственные затраты на выполнение НИР:

$$C_{\text{НИР}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц.н}} + C_{\text{экс}} + C_{\text{нт}} + C_{\text{ком}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{накл}}, \quad 5.2$$

$C_{\text{мат}}$ – затраты на основные материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, необходимые для выполнения НИР, определяющиеся по группам и видам, исходя из расчета потребности в них по ценам, руб.

Затраты на основные материалы, покупные изделия и полуфабрикаты, необходимые для выполнения НИР представлены в таблице 5.4.

$C_{\text{зп}}$ – заработная плата научно-технического персонала, руб., определяется по формуле:

$$C_{\text{зп}} = \sum_{i=1}^n Ч_i \cdot Зст_i \cdot T_{\text{НИР}} \cdot \left(1 + \frac{x}{100}\right), \quad 5.3$$

где $Ч_i$ – количество работников, выполняемых НИР, чел; $Зст_i$ – оклад (тарифная ставка) работника НИР, руб.; $T_{\text{НИР}}$ – период выполнения НИР, лет; x – средний процент доплат к тарифному фонду, равный (70%).

$C_{\text{соц.н}}$ – отчисления на социальные нужды, руб.:

$$C_{\text{соц.н}} = C_{\text{зп}} \cdot \frac{Y}{100}, \quad 5.4$$

Y – отчисления на социальные нужды, равные 30%; $C_{\text{эн}}$ – затраты на энергию, необходимую для проведения НИР, руб.

Таблица 5.4

Перечень затрат на основные материалы, покупные изделия и полуфабрикат, необходимых для выполнения НИР

Наименование	Количество	Стоимость руб.
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	50 кг	400
Песок доизмельченный	50 кг	180
Песок перлитовый вспученный М75	100 кг	3160
Перлитовая пыль (отход пр-ва перлита М75)	7,5 кг	562
Суперпластификатор Melflux	0,1 кг	70
Vinnapas 5010N	0,1 кг	27
Esaron 1214	0,01 кг	5
Итого:		4405

Теперь посчитаем расходы на оплату труда научно-технического персонала и зарплаты руководителя.

Зарплата аспиранта:

$$C_{\text{зп.аспир.}} = 1 \cdot 10000 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{70}{100}\right) = 17000 \text{ руб.}$$

Зарплата руководителя

$$C_{\text{зп.рук.}} = 1 \cdot 22000 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{70}{100}\right) = 37400 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{зп}} = C_{\text{зп.аспир.}} + C_{\text{зп.рук.}} = 17000 + 37400 = 54400 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{соц.н}} = C_{\text{зп}} \cdot \frac{Y}{100} = 54400 \cdot \frac{30}{100} = 16320 \text{ руб.}$$

где Y – процент отчислений на социальные нужды.

$C_{\text{экс}}$ – затраты на эксплуатацию оборудования, установок, стендов приборов, приспособлений и инструментов для выполнения НИР, руб., определяем по формуле:

$$C_{\text{экс}} = C_a + C_p + C_{\text{эн}} + C_{\text{эвм}}, \quad 5.5$$

где C_a – затраты на амортизацию оборудования, руб., C_p – затраты на текущий ремонт оборудования по НИР, руб., $C_{\text{эн}}$ – затраты на энергию, необходимую для проведения НИР определяется по формуле:

$$C_{ЭН} = N \cdot T_{эф.м.} \cdot Ц_{ЭН}. \quad 5.6ж$$

где N – мощность, потребляемая оборудованием, кВт, $T_{эф.м.}$ – фактический фонд времени работы оборудования по НИР, маш-ч., $Ц_{ЭН.}$ – цена за 1 кВт·ч энергии, руб.

$$C_{ЭН} = 0,7 \cdot 100 \cdot 5 = 75 \text{ руб.}$$

$C_{ЭВМ}$ - затраты на использование вычислительной техники, руб., определяется по формуле:

$$C_{ЭВМ} = T_{эф.} \cdot Ц_{ЭВМ}, \quad 5.7$$

где $T_{эф.}$ – фактический фонд времени работы ЭВМ, маш-ч, $Ц_{ЭВМ}$ – стоимость (цена) часа работы ЭВМ, руб.

$$C_{ЭВМ} = 100 \cdot 27 = 2700 \text{ руб.}$$

$$C_{ЭКС} = 1381 + 75 + 2700 = 4156 \text{ руб.}$$

$$C_{НИР} = C_{мат} + C_{зп} + C_{соц.н} + C_{ЭКС} + C_{нт} + C_{ком} + C_{пр} + C_{накл},$$

Определим затраты на амортизацию пневматического смесителя.

Стоимость лабораторного образца пневматического смесителя 55000 руб., срок службы 1000 часов, таким образом:

$$A_{см} = \frac{55000 \cdot 2,5}{8700} = 15 \text{ руб.}$$

$$C_a = A_{см} = 15 \text{ руб.} \quad 5.8$$

Расчет затрат на энергию, необходимую для проведения НИР, приведен в табл.5.5.

Таблица 5.5

Расчет затрат на электрическую энергию

Потребитель	Потребляемая мощность, кВт·ч	Фактическая продолжительность работы, ч	Тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч	Сумма затрат, руб.
Пневматический смеситель	-	2,5	4,9	-
ЭВМ	0,5	100	4,9	490
Итого:				490

Затраты на текущий ремонт оборудования примем 10% от стоимости оборудования:

$$C_p = 55000 \cdot 0,1 = 5500 \text{ руб.}$$

Таким образом, затраты на эксплуатацию оборудования, установок, стендов приборов, приспособлений и инструментов для выполнения НИР будут равны:

$$C_{\text{экс}} = 1381 + 75 + 490 + 2700 = 4646 \text{ руб.}$$

$C_{\text{нт}}$ – расходы на научно-техническую информацию, руб. (Интернет 20 ч по 24 руб./д):

$$C_{\text{нт}} = 20 \cdot 24 = 480 \text{ руб.}$$

$C_{\text{пр}}$ – прочие прямые затраты (оплата консультаций, экспертиза, патентный поиск и пр.):

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц.н}} + C_{\text{экс}} + C_{\text{нт}} \quad 5.9$$

$$C_{\text{пр}} = (4405 + 54400 + 16332 + 4646 + 300) = 80083 \text{ руб.}$$

$C_{\text{накл}}$ – накладные расходы, которые определяются в размере 10-15% от прямых затрат, руб:

$$C_{\text{накл}} = 80083 \cdot 0,1 = 8008 \text{ руб}$$

$C_{\text{накл}}$ – определения общей величины $C_{\text{НИР}}$ соответствующая смета затрат табл. 5.6.

Таблица 5.6

Смета затрат на проведение НИР

Наименование статьи затрат	Сумма, руб.
1. Материалы основные, покупные и комплектующие изделия	4405
2. Основная и дополнительная заработная плата	54400
3. Отчисление на социальные нужды	16332
4. Затраты на эксплуатацию оборудования	4646
5. Затраты на научно-техническую информацию	300
6. Расходы на командировки	0
Итого прямых расходов	80083
7. Накладные расходы	8008
Итого	88011
Срок окупаемости проекта, лет	2,4

Таким образом, сумма капитальных вложений в НИР составит 88011 рублей.

Расчет оптовой цены единицы техники

Себестоимость создания пневматического смесителя C_2 определим укрупненно с использованием основных показателей:

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{Q_2 \cdot K_{\text{усл}}}{Q_1} \quad 5.10$$

где C_1 – себестоимость базового смесителя, руб., Q_1 и Q_2 – значение производительности до и после внедрения установки, руб., $K_{\text{усл}}$ – коэффициент, учитывающий усложнения новой установки пневматического смесителя:

$$C_2 = 300000 \cdot \frac{200 \cdot 1,5}{200} = 450000 \text{ руб.}$$

Цена нового пневматического смесителя:

$$\text{Ц}_2 = C_2 + \frac{P_2}{100} C_2, \quad 5.11$$

где P_2 – рентабельность продукции, %.

$$\text{Ц}_2 = 450000 + \frac{60}{100} 450000 = 720000 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости капитальных вложений

Срок окупаемости капитальных вложений (период возврата капитальных вложений) определяется по формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta\Pi_t}, \quad 5.12$$

где $\Delta\Pi_t$ – прирост чистой прибыли, руб.

$$\Delta\Pi_t = (\text{Ц}_2 - C_2) - (\text{Ц}_1 - C_1) \quad 5.13$$

где Ц_1 – оптовая цена единицы техники, руб.

$$\Delta\Pi_t = (720000 - 450000) - (270000 - 300000) = 300000 \text{ руб.}$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{390411}{300000} = 1,3 \text{ года}$$

где K – расчет капитальных вложений, руб., расчет по формуле:

$$K = \text{Ц}_1 \cdot K_{\text{дм}} + K_{\text{НИР}} \quad 5.14$$

$$K = 270000 \cdot 1,12 + 88011 = 390411 \text{ руб.}$$