

На правах рукописи



Шеметова Ольга Михайловна

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

Специальность 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

Научный руководитель:

Фадин Юрий Михайлович

кандидат технических наук, доцент
кафедры механического оборудования
БГТУ им. В. Г. Шухова

Официальные оппоненты:

Евсеев Алексей Владимирович

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры промышленной
автоматики и робототехники Тульского
государственного университета

Алексеев Константин Андреевич

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры процессов и аппаратов
химической технологии Казанского
национального исследовательского
технологического университета

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»

Защита состоится «27» июня 2024 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.03 на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, ауд. ГК 214.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте (URL: https://gos_att.bstu.ru/dis/Shemetova)

Автореферат размещен на сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.А. Семикопенко
к.т.н., доцент

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

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 сравнении с существующими. 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. 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., Варакин 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 C.M., Gerick H.R., 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 воздействие 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 "АПК «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.

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. 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.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, указана степень ее разработанности, цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов работы.

В первой главе рассмотрено современное состояние развития техники и технологии смешивания сухих строительных смесей отечественного и зарубежного производства и их важность на строительном рынке. Проведенный анализ показал, что пневматические смесители используются для смешивания сухих мелкодисперсных материалов. Учитывая направление развития этого оборудования и его существующие недостатки, разработана и запатентована конструкция пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой (рисунок 1). Камера смесителя реализует режим хаотично-вихревого движения энергоносителя с материалом за счет тангенциально-составляющих скоростей потока. Это

обеспечивает интенсивное смешивание материалов и ведет к увеличению степени однородности и, соответственно, повышению качества готового продукта.

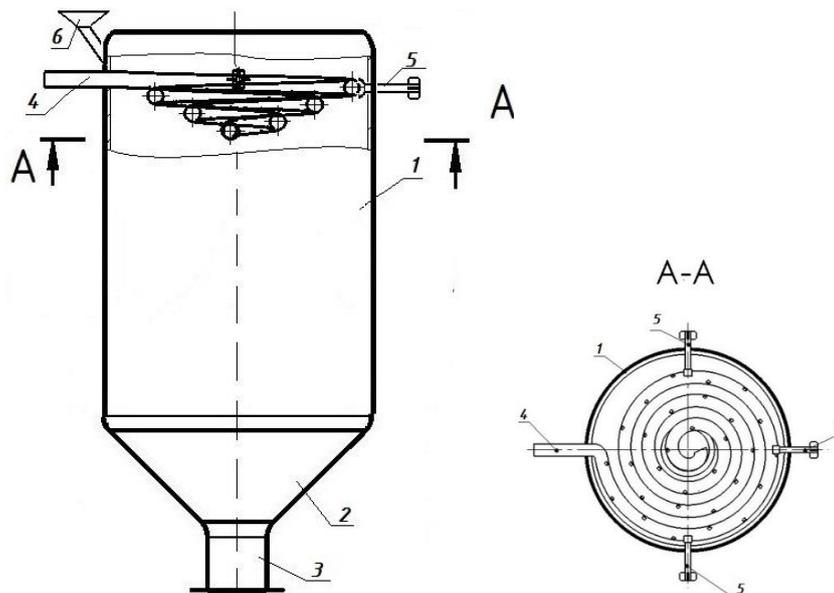


Рисунок 1 Схема пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой:
 1 – корпус; 2 – конус; 3 – патрубок; 4 – спиральная энергонесущая трубка;
 5 – держатели; 6 – патрубок

Работа смесителя 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.

На основании вышеизложенного определены цель и задачи исследований.

Во второй главе описаны теоретические исследования процесса смешивания сухой теплоизоляционной смеси в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой.

На основании расчетной схемы (рисунок 2) получены аналитические выражения, определяющие движение воздушной среды в цилиндрической камере пневматического смесителя.

Используя уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

определено поле скоростей воздушной смеси в цилиндрической камере. При условии, что плотность воздушной смеси внутри камеры является постоянной величиной, уравнение (1) можно привести к виду:

$$\operatorname{div} \vec{\vartheta} = 0. \quad (2)$$

Решение дифференциального уравнения найдено с использованием метода Фурье при граничных условиях:

$$\vartheta_z(r = 0, z = H_B) = \vartheta_B, \quad (3)$$

$$\vartheta_r\left(r = r_k = \frac{D_0}{2}, z = z_k = H_B\right) = 0. \quad (4)$$

Обозначения: R_k – радиус камеры смешивания, м; H_B – высота от начала координат до конца 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; D_0 – диаметр выходного патрубка, м; ϑ_B – скорость воздуха, м/с.

Выражения, определяющие поле скоростей воздушного потока в цилиндрической камере смесителя:

$$\vartheta_r = \begin{cases} \frac{\vartheta_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 I_1(\lambda_1 r) \cos(\lambda_1 z)}{I_0\left(\lambda_1 \frac{D_0}{2}\right) \cdot \sin(\lambda_1 H_B)}, & 0 \leq r \leq r_0, 0 \leq z \leq H_B, \\ \frac{\vartheta_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 I_0(\lambda_1 r_0) K_1(\lambda_1 r) \cos(\lambda_1 z)}{I_0\left(\lambda_1 \frac{D_0}{2}\right) \cdot \sin(\lambda_1 H_B) K_0(\lambda_1 r_0)}, & r \geq r_0, 0 \leq z \leq H_0. \end{cases} \quad (5)$$

$$\vartheta_z = \begin{cases} \frac{\vartheta_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 I_0(\lambda_1 r) \sin(\lambda_1 z)}{I_0\left(\lambda_1 \frac{D_0}{2}\right) \cdot \sin(\lambda_1 H_B)}, & 0 \leq r \leq r_0, H_0 \leq z \leq H_B, \\ \frac{\vartheta_0 \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 I_0(\lambda_1 r_0) K_0(\lambda_1 r) \sin(\lambda_1 z)}{I_0\left(\lambda_1 \frac{D_0}{2}\right) \cdot \sin(\lambda_1 H_B) K_0(\lambda_1 r_0)}, & r \geq r_0, 0 \leq z \leq H_0. \end{cases} \quad (6)$$

где - $I_0(\xi)$ и $K_0(\xi)$ и $I_1(\xi)$ и $K_1(\xi)$ – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка; ϑ_0 – скорость поступления воздуха в спиральную энергонесущую трубку, м/с; d_0 – диаметр спиральной энергонесущей трубки, м; r_0 – средний радиус витков спирали, м.

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

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \overline{\vartheta_z} \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{D_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (7)$$

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

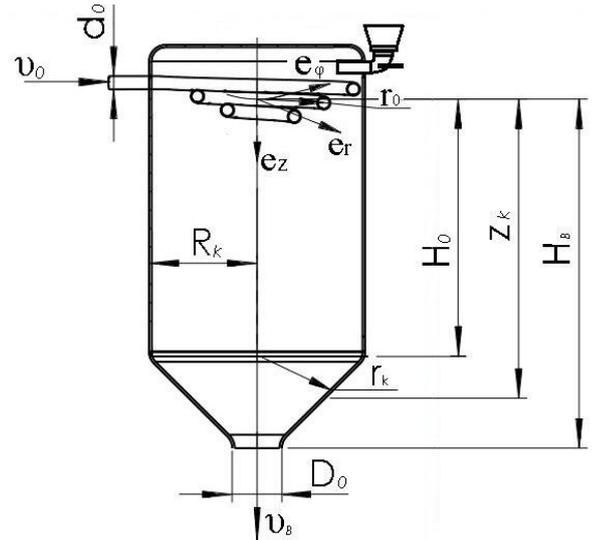


Рисунок 2 Расчетная схема

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

Смеситель характеризуется наличием установившегося (не зависящим от времени) режимом смешивания. Поэтому можно предположить, что изменение концентрации (c) в этом случае будет зависеть только от двух переменных $c(z, r)$. На основании этого факта уравнение (7) можно представить в виде:

$$D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \overline{\vartheta}_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{D_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) = 0. \quad (8)$$

Параметры продольного и радиального перемешивания прямо пропорциональны средним значениям скоростей движения в продольном и радиальном направлениях, а также геометрическим размерам. На этом основании можно записать

$$D_z = \overline{\vartheta}_z H_0, \quad (9)$$

$$D_r = \overline{\vartheta}_r R_k, \quad (10)$$

где H_0 – высота от конца спиральной трубки до конца цилиндрической части камеры смешивания, м.

Для определения значений концентрации использовали следующие граничные условия:

$$c(r = r_0, z = 0) = c_0, \quad (11)$$

где c_0 – начальное значение.

Выражение, определяющее изменение концентрации выделенной компоненты от параметров камеры смешивания (высоты и радиуса):

$$c(r, z) = c_k - (c_k - c_0) \cdot \frac{Y_0\left(\beta_1 \frac{r}{R_k}\right)}{Y_0\left(\beta_1 \frac{r_0}{R_k}\right)} e^{k_1 \frac{z}{H_0}}, \quad (12)$$

где $Y_0\left(\beta_1 \frac{r}{R_k}\right)$ – является функцией Бесселя первого рода нулевого порядка; c_k – конечное значение концентрации; c_0 – начальное значение.

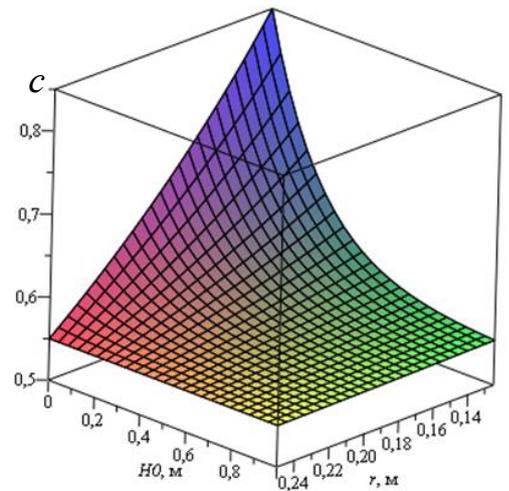


Рисунок 3 График изменения концентрации относительной исходной компоненты:

при $\vartheta_0 = 35$ м/с; $d_0 = 0,016$ м; $D_0 = 0,05$ м;
 $H_B = 1$ м; $r_0 = 0,125$ м; r от r_0 до R_k ;
 $c_0 = 0,85$; $c_k = 0,5$

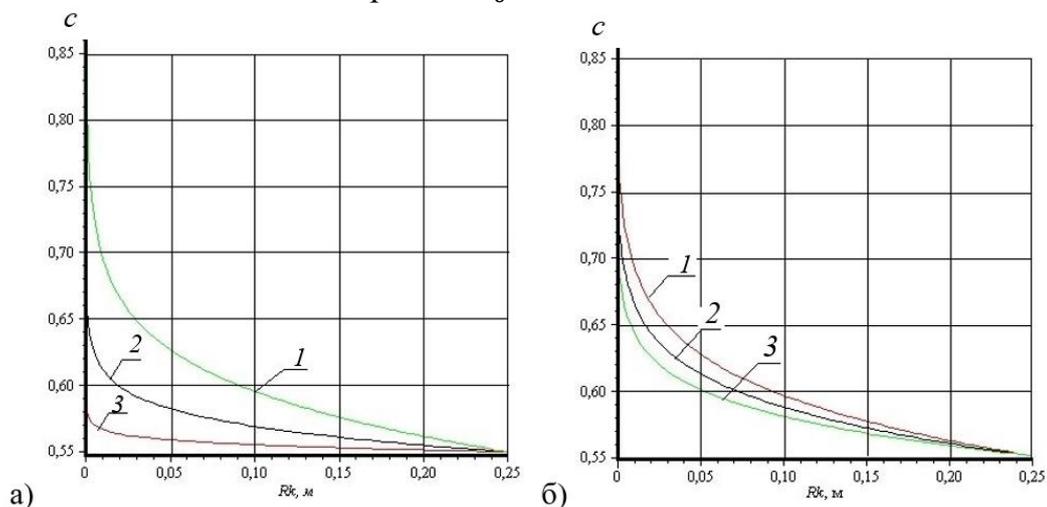


Рисунок 4 Изменения концентрации выделенной компоненты при $0 \leq Rk \leq 0,25$:
 а) 1 – $H_0 = 0,6$ м; 2 – $H_0 = 0,8$ м; 3 – $H_0 = 1$ м; б) 1 – $r_0 = 0,075$ м; 2 – $r_0 = 0,1$ м; 3 – $r_0 = 0,125$ м

На рисунке 3 представлено изменение концентрации ключевого компонента c в зависимости от изменения высоты цилиндрической камеры (H_0) и координаты r в интервале $r \geq r_0$. При увеличении высоты цилиндрической части корпуса смесителя H_0 от 0,6 до 1 м (рисунок 4,а) и увеличении среднего радиуса витка спирали r_0 от 0,075 до 0,125 м (рисунок 4,б) значение концентрации выделенной компоненты снижается до минимального значения, равного 0,55. Такое влияние изменения высоты камеры на процесс смешивания показывает, что, чем ниже выделенная компонента будет находиться в цилиндрической камере, тем ниже будет ее концентрация, а чем больше будет значение r_0 , тем больше происходит воздействие сжатого воздуха на смешиваемый материал и минимизируются участки с минимальным воздействием воздуха на компоненты.

Производительность пневматического смесителя, кг/с:

$$Q = \rho_{\text{ср}} \vartheta_{\text{в}} \frac{\pi D_0^2}{4}. \quad (13)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ - средняя плотность смешиваемых компонентов, кг/м³.

В третьей главе представлен план и методика проведения экспериментальных исследований с использованием разработанной установки пневматического смесителя, оснащённого спиральной энергонесущей трубкой. При проведении экспериментальных исследований использовано современное контрольно-измерительное и вспомогательное оборудование.

Общий вид смесительного комплекса представлен на рисунке 5.

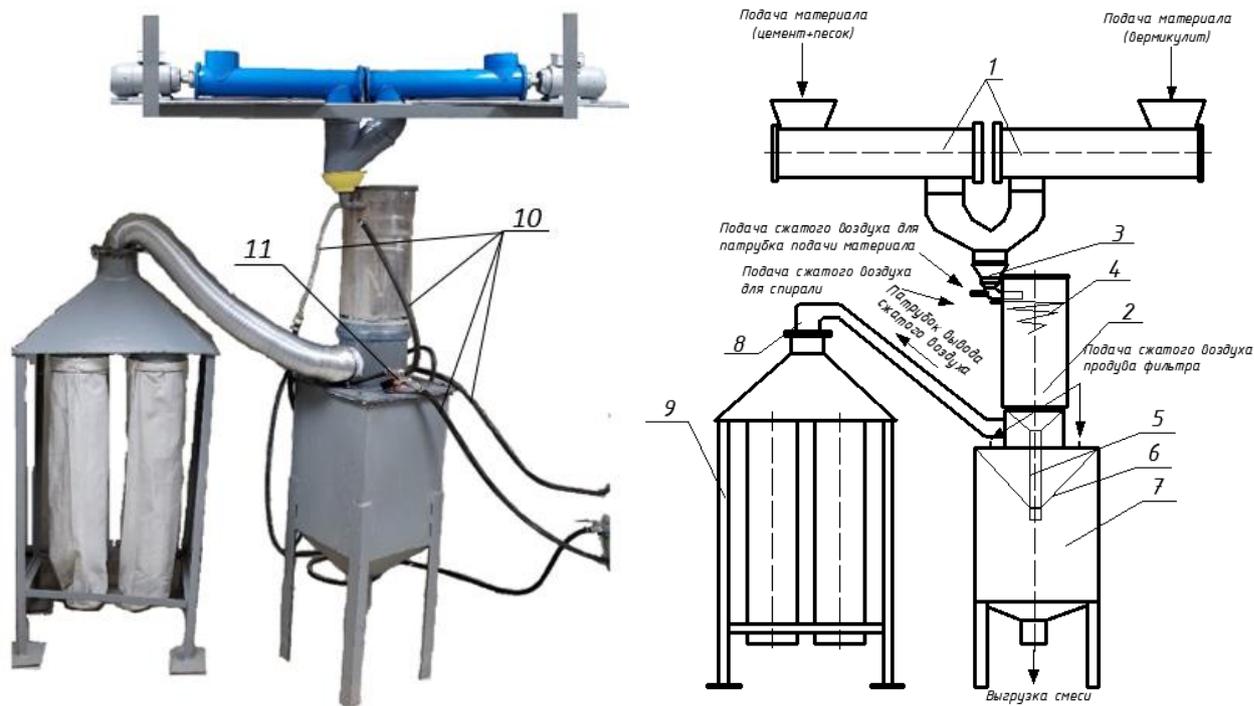


Рисунок 5 Технологическая схема смесительного комплекса:

- 1- шнековый дозатор; 2 – корпус смесителя; 3 - загрузочный патрубок смесителя;
- 4 – спиральная трубка; 5 – труба; 6 – фильтр; 7 – бункер пылеразделения;
- 8 – патрубок вывода сжатого воздуха; 9 – рукавный фильтр; 10 - шланги подачи сжатого воздуха;
- 11 – измерительные приборы.

Дозированная подача компонентов смеси осуществляется через выгрузочный патрубок шнекового дозатора 1. Скорость подачи компонентов регулируется в соответствии с требуемым соотношением. В корпусе смесителя 2 компоненты встречаются со сжатым воздухом, который поступает через шланги подачи воздуха и выходит из отверстий в спиральной энергонесущей трубке 4. После цикла перемешивания под нагнетанием компрессора (на схеме не показан) готовая смесь выходит в трубу 5. Затем она попадает в бункер пылеразделения 6, где сжатый воздух уходит через фильтр 7, оставляя на нем пылевидные частицы. Частично очищенный воздух уходит через патрубок вывода сжатого воздуха 8 в рукавный фильтр 9 для дополнительной очистки, а материал накапливается в бункере. Через некоторое время подача сжатого воздуха прекращается и материал выгружается из бункера при открытии затвора. Лабораторная установка смесительного комплекса работает под разрежением за счет установленного вентилятора низкого давления после рукавного фильтра (на схеме не показан).

В диссертационной работе рассмотрен и проанализирован состав теплоизоляционного материала в соотношении: 1 часть портландцемента ПЦ М500 (1200 кг/м³), 1 часть кварцевого фракционированного песка (1300 кг/м³), 2 части вспученного вермикулита (150 кг/м³). Во время планирования лабораторных исследований был выбран план полнофакторного эксперимента ПФЭ ЦКРП 2⁴.

В качестве исследуемых факторов при проведении экспериментов для смешивания сухой теплоизоляционной смеси 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, выбраны: часовая производительность Q , кг/ч, коэффициент неоднородности смеси V_c , %, предел прочности на сжатие образцов $\sigma_{сж}$, МПа.

В четвертой главе представлена проверка 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 для получения теплоизоляционной смеси с требуемыми техническими характеристиками.

На основании полученных значений, после проведения лабораторных экспериментов и обработки экспериментальных данных, получено уравнение регрессии производительности в кодированном виде:

$$Q = 13,63 - 0,47 \cdot x_1 + 0,6 \cdot x_2 - 0,18 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_4 - 0,46 \cdot x_1^2 - 0,08 \cdot x_2^2 - 0,086 \cdot x_3^2 - 0,25 \cdot x_4^2 - 0,188 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,05 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,155 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0,24 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,44 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,076 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (14)$$

Анализ уравнения регрессии (14) производительности Q смесителя, где количество отверстий на спиральной энергонесущей трубки x_2 (n) имеет положительное (+) значение и при увеличении этого фактора повышается производительность. 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 коэффициента загрузки материала x_3 (ψ) начинает накапливаться избыточное давление, что затрудняет выход материала из него и снижает производительность (Q). Отверстия на спиральной трубке расположены равномерно и при увеличении шага спирали x_4 (H) воздействие на материал будет происходить не в одной зоне смесителя, а равномерно по всей камере, и при увеличении давления x_1 (P) движение материала по камере будет затруднено.

Получено уравнение регрессии коэффициента неоднородности в кодированном виде:

$$V_c = 3,1 - 1,12 \cdot x_1 - 1,77 \cdot x_2 + 0,28 \cdot x_3 - 1 \cdot x_4 + 1,31 \cdot x_1^2 + 0,84 \cdot x_2^2 + 0,22 \cdot x_3^2 + 0,19 \cdot x_4^2 - 0,04 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,43 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,3 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,44 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,93 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,43 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (15)$$

Анализ уравнения регрессии (15) 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 происходит интенсификация процесса смешивания, и тем самым снижается коэффициент неоднородности.

Получено уравнение регрессии предела прочности готового образца в кодированном виде:

$$\sigma_{сж} = 3,01 - 0,3 \cdot x_1 - 0,104 \cdot x_2 + 0,03 \cdot x_3 - 0,27 \cdot x_4 + 0,0062 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,068 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,15 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,106 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,143 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,068 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0,28 \cdot x_1^2 + 0,27 \cdot x_2^2 + 0,12 \cdot x_3^2 + 0,08 \cdot x_4^2. \quad (16)$$

Анализ уравнения регрессии (16) 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 сжатие. 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, что положительно влияет на смешивание компонентов, с увеличением шага спирали x_4 (H) воздействие на материал будет происходить не в одной зоне смесителя, а равномерно по всей камере, что положительно влияет на процесс смешивания.

График зависимости $\sigma_{сж} = f(P, n)$ на рисунке 6 носит параболический характер для фиксированных значений $\psi = 70\%$ и $H = 30$ мм и для всех значений количества отверстий на спиральной трубке n .

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.

График зависимости $V_c = f(P, n)$ на рисунке 7 носит параболический характер для фиксированных значений $\psi = 70\%$, $H = 30$ мм и для всех значений количества отверстий на спиральной трубке n .

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.

График зависимости $Q = f(P, n)$ на рисунке 8 носит параболический характер при фиксированных значениях $\psi = 70\%$, $H = 30$ мм и всех значений количества отверстий на спиральной трубке n . 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.

Основным критерием оценки качества теплоизоляционной смеси является предел прочности на сжатие готовых образцов, изменяющийся в пределах 1,5...5 МПа, который зависит от коэффициента неоднородности. Значения производительности принимаются в соответствии с выполнением требований: $\sigma_{сж} \rightarrow 1,5...5$ МПа, $V_c \rightarrow \min$ и $Q \rightarrow \max$.



Рисунок 6 График зависимости $\sigma_{сж} = f(P, n)$ при $\psi=70\%$ и $H=30$ мм

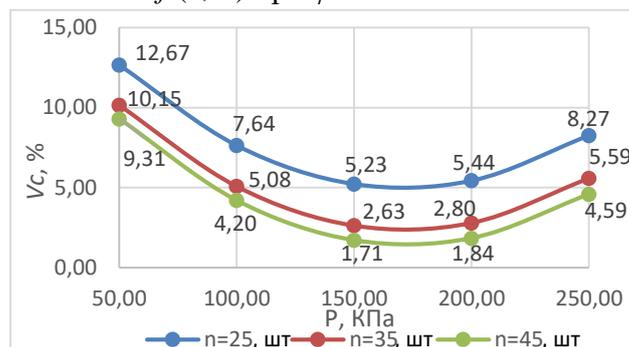


Рисунок 7 График зависимости $V_c = f(P, n)$ при $\psi=70\%$ и $H=30$ мм

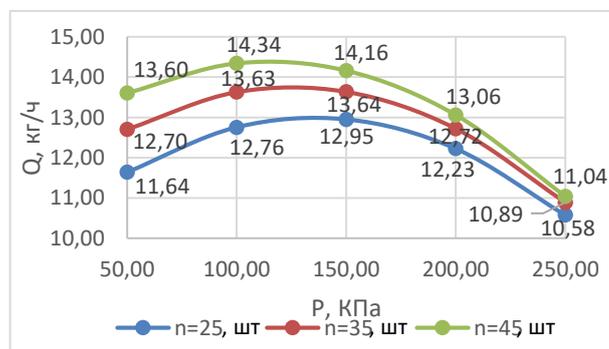


Рисунок 8 Графики зависимости $Q = f(P, n)$ при $\psi=70\%$ и $H=30$ мм

Таким образом, принимаем рациональные параметры пневматического смесителя:

- давление сжатого воздуха равное 100 КПа, которое позволяет обеспечить качественный процесс смешивания при незначительном расходе энергоносителя;
- количество отверстий на спиральной трубке 35 шт., которых достаточно, чтобы провести качественное смешивание без значительного расхода энергоносителя, как при большом количестве отверстий;
- коэффициент загрузки равный 60-70%, так как при меньших и больших значениях снижается производительность;
- шаг спирали равный 30 мм, который позволяет беспрепятственно проходить материалу через спираль в камеру, т.к. она сосредоточена не в одной зоне камеры, а равномерно распределена по ней.

Для сравнения результатов лабораторных исследований и теоретических расчетов было выполнено сравнение концентрации ключевого компонента при разных значениях количества отверстий на спиральной энергоносительной трубке, расхождение между лабораторными экспериментами и теорией составило не более 8 %.

В пятой главе приведено описание исследования новых составов теплоизоляционных материалов на предмет соответствия их технологическим характеристикам. Исследования проводились на предприятии АО "АППК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ»" с использованием разработанного пневматического смесителя со спиральной энергоносительной трубкой. В результате установлено, что состав с соотношением компонентов цемент (1 часть) : песок (1 часть) : вермикулит (2 части) соответствует свойствам и характеристикам стандарта.

Разработанный пневматический смеситель позволяет получить сухую теплоизоляционную смесь с необходимыми качественными физико-механическими характеристиками без расслоения на составляющие компоненты и позволяет смешивать материал с разной плотностью.

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 энергоносительной 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 энергонесущей 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 0,55, 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 "АППК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ»" установлено, что наиболее целесообразно соотношение компонентов в композиционной теплоизоляционной смеси 1:1:2 (цемент : песок : вермикулит). Предприятием АО "АППК «БЕЛСЕЛЬХОЗИНВЕСТ»" внедрен полупромышленный образец пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой для получения теплоизоляционных смесей, соответствующих техническим условиям стандарта.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **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.

2. **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.

3. **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.

4. **Шеметова, О.М.** Процесс смешивания компонентов сыпучего материала в пневматическом смесителе [Текст] // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 17-2. – С. 273-280.

5. **Шеметова, О.М.** Проведение лабораторных исследований по определению неоднородности смеси в пневматическом смесителе [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, 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.

6. **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.

В издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus, рекомендованном ВАК РФ:

1. **Shemetova, O.M., Fadin, Y.M., Bogdanov, V.S.** Production of uniform fine

mixtures in a pneumatic system [Text] // Russian Engineering Research. – 2022. – Т. 42. – № 5. – С. 520-522.

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus:

1. **Shemetova, O.M.**, Fadin, Y.M., Voronov, V.P., Shemetov, E.G. Pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube [Text] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Т. 160 LNCE. – С. 333-339.

2. **Shemetova, O.M.**, Fadin, Y.M., Voronov, V.P., Bogdanov, V.S. Research Study of Mixing Processes in the Pneumatic Mixer for Dry Construction Mixes [Text] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2023. – Т. 307 LNCE. – С. 243-525.

Патенты на полезную модель:

1. **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.

2. **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.

3. **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.

В сборниках трудов и докладов конференций:

1. **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.

2. **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.

3. **Шеметова, О.М.** Направление совершенствования пневматических смесителей [Текст] / О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин // В сб.: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 265-272.

4. **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.

5. **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.

6. **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.

7. **Шеметова, О.М.** Разработка и исследования пневмосмесителя в программном продукте solid works [Текст] // В сб.: Молодежь и научно-технический прогресс. – Губкин: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 101-104.

8. **Шеметова, О.М.** Основы методики расчета пневмосмесителя [Текст]. – М.: Белорусско-Российский университет. Могилев, 2022. – С. 96.

9. **Шеметова, О.М.** Лабораторная установка пневмосмесителя [Текст] / О.М. Шеметова, Е.Г. Шеметов, В.В. Мишенина // В сб.: Образование. Наука. Производство. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 59-61.

10. **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.