

На правах рукописи



**ШЕРЕМЕТ ЕВГЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОСТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЫ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОЦЕМЕНТА**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы  
(строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново - 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Белгородский государственный  
технологический университет им. В.Г. Шухова»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Уваров Валерий Анатольевич**

**Официальные оппоненты:** **Сиваченко Леонид Александрович**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Транспортные и  
технологические машины»,  
МОУ ВО  
«Белорусско-Российский университет»

**Шарапов Рашид Ризаевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
«Механизация строительства»,  
МОУ ВО «Московский государственный  
строительный университет»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Ярославский государственный  
технический университет»

Защита диссертации состоится 27 декабря 2019 года в 9.00 часов на  
заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО  
«Ивановский государственный политехнический университет» по адресу:  
153000, г. Иваново, Шереметевский пр-кт, д. 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»  
([www.ivgpi.com](http://www.ivgpi.com)).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Н.В. Заянчуковская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Инновационные процессы, которые быстро набирают темпы в РФ, динамично развиваются и в строительной отрасли, затрагивая все её подотрасли и, в частности, производство строительных материалов. Появляется огромное количество новых современных строительных материалов и изделий на их основе, что в свою очередь требует обновления материально-технической базы для их производства. Так, например, совершенно недавно потребителю был предложен новый вид многофункционального цемента, получивший название «микроцемент», который значительно превосходит старые образцы практически по всем показателям. Микроцемент – высокотехнологический материал, который изготавливается на основе широко применяемых цементов, путем помола и сепарирования до сверхтонких фракций с добавлением различных добавок. Это существенно меняет его свойства и позволяет применять в отделочных работах, для усиления строительных конструкций, при восстановлении фундаментов, при строительстве подземных сооружений, при проходке скважин и т.п. Как отмечают потребители, микроцемент становится важнейшим и незаменимым компонентом разнообразных строительных смесей, компаундов, суспензий и пр. Одной из основных характеристик микроцемента является тонкость помола, влияющая на затвердевание цемента на ранних сроках схватывания. Отечественное оборудование в большинстве случаев не всегда способно обеспечить необходимую тонкость помола, а иностранные образцы помольных агрегатов, способные её обеспечивать, являются слишком дорогими и, в силу существующих санкционных ограничений, недоступны российскому производителю. Поэтому, в данной работе предлагается конструкция пневмоструйной мельницы, способная обеспечить необходимую тонкость помола при сравнительно невысоких затратах.

Работа выполнялась в рамках реализации проектной части государственного задания по программе «Умник».

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретической основой для проведения исследования стали работы В.И. Акунова, Г.Н. Абрамовича, А.А. Голеевского, Е.Я. Соколова, Н.М. Зингера, Л.Е. Стернина, Ф. Холланда, Ф. Чапмана, В.Н. Блиничева, В.И. Горобца и др. Информационная база – книги, монографии, научные труды, материалы научно-технических конференций, статьи в научных сборниках по исследуемой проблеме.

В проведенных ранее исследованиях изучены различные варианты конструкций струйных мельниц, в том числе работающих на сжатом

воздухе, исследованы их конструктивно-технологические параметры, предложены и обоснованы теоретические и методологические аспекты их расчета и проектирования. Исследований рассматриваемой в данной работе конструкции пневмоструйной мельницы для получения микроцемента ранее не проводилось.

**Цель работы:** разработка конструкции и теоретических основ расчёта технологических и конструктивных параметров пневмоструйной мельницы для получения микроцемента.

**Задачи исследований:**

- провести анализ различных конструкций современных установок для тонкого и сверхтонкого измельчения, выявить их достоинства, недостатки и основные направления их совершенствования;

- разработать математические выражения, устанавливающие взаимосвязь между конструктивными и технологическими параметрами помольной камеры пневмоструйной мельницы предложенной конструкции;

- аналитически согласовать пропускную способность разгонного узла и загрузочного устройства мельницы;

- провести исследования пневмоструйной мельницы в лабораторных условиях;

- установить в ходе проведения многофакторного эксперимента регрессионные зависимости массовой производительности циклона, массовой производительности рукавного фильтра и удельной поверхности полученного порошка от входных конструктивно-технологических факторов;

- осуществить промышленное внедрение пневмоструйной мельницы для получения микроцемента.

Объектом исследования в работе являлась пневмоструйная мельница для получения порошков микроцемента.

**Научная новизна исследования** заключается в получении:

- математической зависимости, позволяющей определить максимальную объемную пропускную способность разгонных трубок для предложенной конструкции мельницы;

- математического выражения для определения установившегося режима работы пневмоструйной мельницы согласованного с устойчивой подачей измельченного материала вибропитающим устройством;

- аналитического описания колебательных движений частицы материала относительно плоскости встречи двух струй в пределах зоны разрушения в помольной камере;

- соотношения, определяющего время нахождения частицы в области косых соударений частиц материала с частицами, находящимися

во встречной струе в пределах зоны разрушения;

- выражений, описывающих закономерность изменения частиц материала при косых соударениях и значение коэффициента истирания в рассматриваемых условиях работы установки;

- уравнений регрессии, позволяющих определить рациональные режимы процесса измельчения в установке предложенной конструкции.

**Практическая значимость работы** заключается в создании математического выражений для инженерного расчета конструктивно-технологических параметров установки для пневмоструйного измельчения микроцемента, в разработке новой патентной конструкции мельницы и её внедрении в промышленное использование, а также в рекомендациях по выбору рациональных технологических режимов её работы.

**Методология и методы исследования** включали: подбор, изучение и анализ известных научно-технических результатов по рассматриваемой теме, разработку и конструирование мельницы, аналитические и экспериментальные исследования с использованием современных инструментальных методов измерений и приборной базы, а также обработку экспериментальных данных с использованием ЭВМ.

***Положения, выносимые на защиту:***

- математическая зависимость, позволяющая определить максимальную объемную пропускную способность разгонных трубок для предложенной конструкции мельницы;

- математическое выражение для определения установившегося режима работы пневмоструйной мельницы согласованного с устойчивой подачей измельченного материала вибропитающим устройством;

- аналитическое описание колебательных движений частицы материала относительно плоскости встречи двух струй в пределах зоны разрушения в помольной камере;

- соотношение, определяющее время нахождения частицы в области косых соударений частиц материала с частицами, находящимися во встречной струе в пределах зоны разрушения;

- выражения, описывающие закономерность изменения частиц материала при косых соударениях и значение коэффициента истирания в рассматриваемых условиях работы установки;

- уравнения регрессии, позволяющие определить рациональные режимы процесса измельчения в установке предложенной конструкции;

- новая патентно-чистая конструкции установки для пневмоструйного получения микроцемента.

**Степень достоверности и апробация результатов исследования.** Достоверность результатов исследований обеспечена согласованностью с фундаментальными физическими и аэродинамическими теориями,

использованием стандартных методов математического анализа и аттестованной измерительной аппаратурой.

***Апробация результатов работы.***

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы обсуждались и получили одобрение: на Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2017, на II Всероссийской научно-технической конференции «Механизация и автоматизация строительства» Самарского государственного технического университета. – Самара, 2018, на IV Международной научно-технической конференции «Энергетические системы (ICES-2019)», на заседаниях научно-технического семинара кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», на техническом совете ЗАО «Петрохим» (г. Белгород).

***Реализация работы.***

Конструкция установки для пневмоструйного получения микроцемента успешно внедрена и испытана в цехе по производству тампонажного цемента ЗАО «Петрохим» (г. Белгород).

***Публикации.*** Основные положения диссертационной работы изложены в 12 публикациях, в том числе 3 - в изданиях, индексируемых базой данных Scopus, 5 работ опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ. Получен патент РФ №174065 на полезную модель.

***Объем и структура диссертации.***

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержащего основные выводы, рекомендации и направления дальнейших исследований. Работа включает 142 страницы основного машинописного текста, 60 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 147 наименования и 8 страниц приложений.

***Содержание диссертации соответствует п. 1*** Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности, ***п. 5.*** Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов, и оценки их экономической эффективности и ресурса, ***п. 6.*** Исследование технологических процессов, динамики машин, агрегатов, узлов и их взаимодействие с окружающей средой **паспорта специальности 05.02.13-Машины, агрегаты и процессы (строительство).**

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, обозначены научная новизна, практическая ценность, реализация и апробация работы, изложены основные положения работы, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние нового направления в производстве строительных материалов – получение микроцементов и возможностей их применения в различных отраслях народного хозяйства. Установлено, что в настоящее время производство микроцементов имеет высокую востребованность. Проанализированы существующие способы и виды оборудования для получения высокодисперсных порошков, выявлены преимущества технологии и техники для измельчения цемента в мельницах струйной энергии по сравнению с другими видами оборудования.

Предложена новая патентно-чистая конструкция установки для пневмоструйного получения микроцемента (патент на полезную модель РФ №174065).

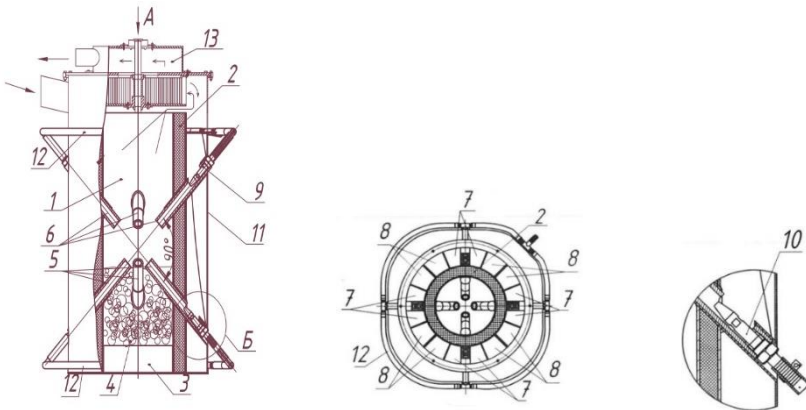


Рисунок 1. Пневмоструйная мельница: а) вид сбоку; б) вид сверху; в) вид Б на виде сбоку

1 – камера помола; 2 – внутренний корпус; 3 – днище; 4 – крупнокусковый измельчаемый материал; 5 – нижние разгонные трубки; 6 – верхние разгонные трубки; 7, 8 – каналы; 9 – верхний пояс эжекторных узлов; 10 – нижний пояс эжекторных узлов; 11 – внешний корпус; 12 – трубопровод; 13 – центробежно-отбойный сепаратор

Струйная мельница содержит вертикальную камеру помола 1 выполненную в виде полого цилиндра, образованного внутренним

корпусом 2, соединенным с днищем 3. На днище уложен слой крупнокускового измельчаемого материала 4, например, цементного клинкера. Нижний пояс разгонных трубок 5 состоит из четырех трубок, расположенных в нижней части помольной камеры. Трубки проходят через внутренний корпус 2, расположены под углом  $90^\circ$  между собой, установлены под углом  $45^\circ$  к плоскости днища и направлены вверх к центру помольной камеры.

Четыре верхние трубки образуют верхний пояс разгонных трубок 6, расположенный симметрично относительно нижнего таким образом, что он направлен навстречу нижнему поясу и угол между ними составляет  $90^\circ$ .

Каналы 7,8 в количестве восьми штук расположены радиально вокруг внутреннего корпуса 2 и служат для подачи измельчаемого материала соответственно в верхний пояс эжекторных узлов 9 и в нижний пояс эжекторных узлов 10. Наружные стенки каналов 7,8 образуют внешний корпус помольной камеры 11.

Нижний и верхний пояса эжекторных узлов закольцованы гибким трубопроводом 12 для подачи сжатого воздуха. В верхней части струйной мельницы над помольной камерой закреплен, например, фланцевым соединением, центробежно-отбойный сепаратор 13.

Струйная мельница работает следующим образом. Измельчаемый материал 4, например цемент, подается в сепаратор 13. Тонкая фракция выносится из сепаратора на осаждение как готовый продукт, грубая осаждается и попадает в каналы 7,8, расположенные между наружным корпусом 11 и внутренним корпусом 2. Далее грубая фракция уносится сжатым воздухом, подведенным по воздуховодам 12 к верхнему и нижнему эжекторным узлам 9, 10 и разгоняется в верхнем поясе разгонных трубок 6 и в нижнем поясе разгонных трубок 5. Измельчение происходит в помольной камере 1 с уложенным на днище 3 крупнокусковым материалом 4 при столкновении за счет удара и истирания. При пересечении восьми потоков с измельчаемым материалом в одной точке измельчение происходит наиболее интенсивно и с меньшими энергозатратами. Далее поток смеси измельченного материала и воздуха следует в сепаратор, там происходит процесс разделения на фракции и цикл повторяется.

Таким образом, предлагаемая конструкция пневмоструйной мельницы позволяет эффективно измельчать материал, что способствует снижению энергозатрат при получении тонкодисперсных порошков. Данное компоновочное решение имеет небольшую металлоёмкость, не требует больших производственных площадей, а также позволяет совместить помол с воздушной сепарацией, сушкой, а при необходимости, и перемешивание нескольких измельчаемых компонентов.



**Во второй главе** представлены теоретические исследования пневмоструйной мельницы. Одной из наиболее значимых величин, определяющих производительность и эффективность помола пневмоструйной мельницы, является пропускная способность разгонной трубки эжекторного узла. Рассмотрим основные допущения и основы её расчета.

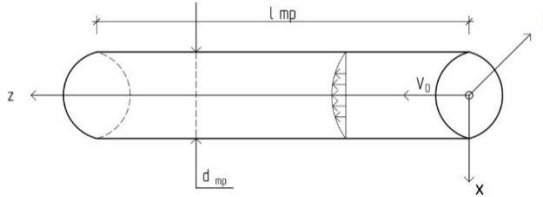


Рисунок 2. Расчетная схема для определения объемной пропускной способности разгонной трубки

Расчет величины  $W_T$ , определяющей пропускную способность разгонной трубки, можно выполнить исходя из следующего соотношения:

$$W_T = \frac{dV_m}{dt}, \quad (1)$$

Объем твердой фазы (цемента) в разгонной трубке найдем согласно расчетной схеме, представленной на рис. 2.

$$V_m = \iiint_V dV \cdot \quad (2)$$

Учитывая, что в силу аксиальной симметрии цилиндрической разгонной трубки диаметром  $d_{mp}$  вычисление интеграла (2) необходимо выполнить в цилиндрической системе координат, и учитывая формулы (1) и (2) после преобразований получим:

$$W_T = 2\pi l_{mp} \int_0^{d_{mp}/2} \frac{dr}{dt} dr \cdot \quad (3)$$

Изменение радиальной координаты  $r$  в единицу времени, как известно, определяет радиальную скорость  $w_r$  движения двухфазного потока:

$$w_r = \frac{dr}{dt}, \quad (4)$$

Изменение значений этой скорости, удовлетворяющее граничному условию:

$$w_r(r = d_{mp}/2) = 0, \quad (5)$$

представим в следующем виде:

$$w_r = v_0 \left[ 1 - \left( \frac{r}{d_{mp/2}} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

здесь  $v_0$  - скорость истечения воздуха из сопла, значение которой определим на основании следующих соотношений:

$$v_0 = \varphi_0 \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{\rho}}, \quad (7)$$

$$\rho = \frac{RT}{P} \quad (8)$$

С учетом (4), (6) формула (3) принимает вид:

$$M_T = 2\pi l_{mp} v_0 \int_0^{d_{mp/2}} \left[ 1 - \left( \frac{2r}{d_{mp}} \right)^2 \right] dr. \quad (9)$$

Вычисление интеграла в (2.11) приводит к следующему результату:

$$W_T = \frac{2}{3} \pi l_{mp} d_{mp} v_0 \quad (10)$$

Подстановка (7) с учетом (8) в (10) позволяет получить окончательно соотношение:

$$W_T = \frac{2}{3} \pi \varphi_0 l_{mp} d_{mp} \sqrt{\frac{2(P - P_0)RT}{P}} \quad (11)$$

Таким образом, полученное выражение (11) определяет максимальную объемную пропускную способность разгонной трубки непосредственно для условий работы мельницы в установленных начальных условиях задачи.

Для вычисления пропускной способности вибрлотка рассмотрим движение порции цемента, поступающего на горизонтально расположенный лоток шириной  $l$  и высотой  $\Delta$ . Плоскость лотка может совершать гармонические колебания с частотой « $\omega$ » и амплитудой « $A$ ». Возбуждающие колебания образуют угол  $\alpha$  с горизонтом лотка (рис. 3).

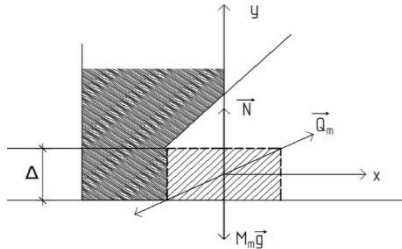


Рисунок 3. Расчетная схема для определения скорости виброперемещения порции цемента вдоль поверхности загрузочного лотка.

Согласно расчетной схемы, представленной на рисунке 3, на выделенный элемент цемента, поступающего из загрузочного бункера, будут действовать следующие силы:

$$\vec{P} = M_m \cdot \vec{g} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_{mp} &= fN, \text{ если } \dot{x} > 0 \\ \vec{F}_{mp} &= -fN, \text{ если } \dot{x} < 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\vec{Q}_m = M_m A \omega^2 \sin \omega t \cdot \vec{e} \quad (14)$$

С учетом допущений уравнение движения слоя цемента в векторной форме будет иметь вид:

$$M_m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{P} + \vec{N} + \vec{F}_{mp} + \vec{Q}_m + \vec{F}_c \quad (15)$$

Используя проекцию уравнения на оси «ох» и «оу» и рассматривая случай безотрывного движения слоя цемента вдоль вибрационной плоскости лотка, получим:

$$N - M_m g + M_m \omega^2 A \sin \omega t \sin \alpha = 0 \quad (16)$$

На основании (16) можно получить условие отрыва слоя цемента от колеблющейся плоскости лотка ( $N=0$ ):

$$\frac{A \omega^2 \cdot \sin \omega t \sin \alpha}{g} = 1. \quad (17)$$

В силу того, что  $|\sin \omega t| \leq 1$ , (18)

с учетом (18) соотношение (17) принимает следующий вид:

$$\frac{A \omega^2 \cdot \sin \alpha}{g} \leq 1. \quad (19)$$

Полученное соотношение играет существенную роль в определении характера движения слоя цемента по поверхности вибрирующего лотка.

Объемная пропускная способность вибрирующего лотка будет определяться соотношением:

$$M_n = l \cdot \Delta \cdot V = l \cdot \Delta \cdot A \cdot \omega \cdot \cos \omega t_0 \quad (20)$$

На основании полученных соотношений (11) и (20) можно записать выражение, определяющее согласованную работу рассматриваемой пневмоструйной мельницы и питателя, состоящего из бункера и вибрирующего лотка:

$$l \cdot \Delta \cdot A \cdot \omega \cdot \cos \omega t_0 = \frac{2}{3} \pi \varphi_0 l_{mp} d_{mp} \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{P}} RT \cdot n_0, \quad (21)$$

где  $n_0$  – число разгонных трубок.

Таким образом, формула (21) определяет установившийся согласованный режим работы пневмоструйной мельницы и вибропитателя в зависимости от её конструктивных и технологических параметров.

Был рассмотрен процесс взаимодействия частиц цемента при встречном взаимодействии струй, вытекающих из разгонных трубок.

Движение частиц цемента, вытекающих из разгонной трубки со скоростью  $u_0$ , рассматривался в рамках стоксовского приближения.

Для описания данного движения введем двумерную декартовую систему координат (xoy) с центром как показано на рис. 4.

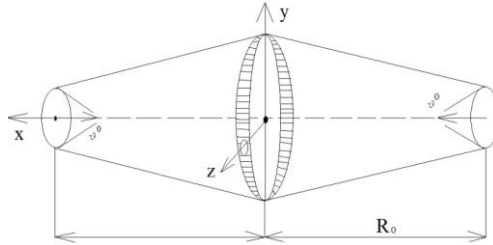


Рисунок 4. Расчетная схема для описания изменения скорости частицы цемента при взаимодействии встречных струй

Таким образом были получены выражения:

$$x(t) = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \cos(\gamma t - \gamma_0), \quad (22)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{A}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\gamma \cdot t - \gamma_0) - A \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\gamma \cdot t - \gamma_0), \quad (23)$$

$$A = R_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{g_0 - R_0/\tau}{R_0^2 \cdot \gamma^2}\right)^2}{\gamma^2}} = R_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{g_0}{R_0} - \frac{1}{\tau}\right)^2}{\gamma^2}}, \quad (24)$$

$$tg \gamma_0 = -\frac{\frac{g_0}{R_0} - \frac{1}{\tau}}{\gamma}. \quad (25)$$

Полученное решение выражений (22) и (23) с параметрами (24), (25) описывает колебательное движение частицы материала относительно плоскости встречи двух струй при выполнении условия  $d > d_{\min}$ .

Время пребывания  $t_0$  частицы цемента в области, где частица совершает колебательное движение можно определить из следующего условия:

$$\frac{dx}{dt}(t = t_0) = 0. \quad (26)$$

Применив условие (26) к выражению (23) получаем:

$$-\frac{1}{\tau} \cdot \cos(\gamma \cdot t_0 - \gamma_0) - \gamma \sin(\gamma \cdot t_0 - \gamma_0) = 0. \quad (27)$$

На основании (27) имеем:

$$t_0 = \frac{1}{\gamma} \left( \gamma_0 + \frac{1}{\gamma \cdot \tau} \right). \quad (28)$$

Полученное соотношение (25) определяет время нахождения частицы в области, где проходят косые соударения частиц цемента с частицами цемента находящимися во встречной струе.

В разделе 2.4 рассмотрен процесс разрушения частиц цемента истиранием при косых соударениях в области встречных струй, когда траектория движения частиц отклоняется от оси симметрии.

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение диаметра частицы материала при разрушении истиранием имеет вид:

$$\frac{d(d_x)}{dt} = -\frac{\lambda_0}{3} \left(1 - \beta \frac{t}{t_0}\right) dx. \quad (29)$$

С математической точки зрения уравнение (29) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными. Разделение переменных в (29) приводит к следующему результату:

$$\frac{d(d_x)}{dx} = -\frac{K_x \cdot \gamma}{3} \int_0^{t_0} \left(1 - \beta \cdot t\right) dt \quad (30)$$

На основании (30) можно записать:

$$\int_{d_0}^{d_k} \left(\frac{d(d_x)}{dx}\right) = -\frac{K_x \cdot \gamma}{3} \int_0^{t_0} \left(1 - \beta \cdot t\right) dt. \quad (31)$$

Вычисление интегралов в выражении (31) приводит к результату:

$$\ln\left(\frac{d_k}{d_0}\right) = -\frac{K_x \cdot \gamma}{3} \cdot t_0 \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \quad (32)$$

Если в формуле (32) в качестве конечного значения диаметра частицы цемента поместить значение  $d_{min}$ , тогда можно получить значение коэффициента истирания:

$$K_x = \frac{3 \ln\left(\frac{d_0}{d_{min}}\right)}{\gamma \cdot t_0 \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)} \quad (33)$$

Таким образом, полученные соотношения (32) и (33) определяют закон изменения диаметра частицы цемента при косых соударениях и значение коэффициента истирания.

На основании разработанных аналитических выражений с использованием программы Solidworks были выполнены расчеты. На рис. 5 представлены результаты расчета распределения давления в рассмотренной выше конструкции пневмоструйной мельницы и приведены цветные диаграммы распределения давления в разрезе помольной камеры.

В обоих случаях наблюдается формирование ядра давлений, однако в первом случае ядро имеет вытянутый профиль вдоль вертикальной оси помольной камеры.

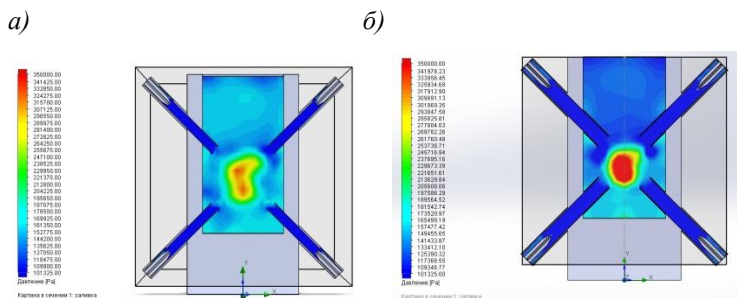


Рисунок 5. Результаты численного моделирования распределения давлений в помольной камере пневмоструйной мельницы:

- а) - при минимальных длинах и диаметрах разгонных трубок;  
 б) - при максимальных длинах и диаметрах разгонных трубок

Это может быть связано с геометрическими параметрами помольной камеры, так как верхний и нижний пояс разгонных трубок расположены на значительном расстоянии друг от друга. Кроме того, как видно по распределению цветовой диаграммы давление в ядре едва достигает 0,35 МПа, а максимальное 0,39 МПа.

В случае с максимальными диаметрами и длинами разгонных трубок наблюдается несколько отличное от предыдущего распределение давлений. В центре помольной камеры формируется ярко выраженное ядро, формой, приближающейся к окружности, с давлениями, превосходящими давления, полученные в первом случае. Сформировано достаточно большое пятно со средним давлением 0,35 МПа. Максимальное же давление в помольной камере составило 0,42 МПа.

Таким образом, на основании проведения расчетов, можно спрогнозировать, что в случае с диаметрами и длинами разгонных трубок, находящихся в пределах для длины трубки в пределах 250-264 мм и для диаметра трубки в диапазоне 28-34 мм эффективность процесса измельчения в пневмоструйной мельнице будет максимальной.

**В третьей главе** представлены план, программа и определены методики проведения экспериментальных исследований, описана лабораторная установка для тонкого помола цемента в составе экспериментального комплекса, общий вид которого представлен на рис. 6, проведено описание и характеристики материалов, используемых для исследований. Выявлены основные факторы, влияющие на

эффективность процесса помола цемента, установлены уровни их варьирования.



Рисунок 6. Общий вид экспериментального комплекса.

При определении рациональных значений конструктивных и технологических параметров работы установки для пневмоструйного измельчения цемента был реализован центральный композиционный ортогональный план полного факторного эксперимента ПФЭ ЦКОП 2<sup>4</sup>. Уровни варьирования факторов определены по результатам поисковых экспериментов в пределах следующих диапазонов значений:  $x_1$  - число оборотов ротора сепаратора мельницы  $n_1 = 1100\text{--}2050 \text{ мин}^{-1}$ ;  $x_2$  - число оборотов ротора вентилятора мельницы  $n_2 = 2400\text{--}3220 \text{ мин}^{-1}$ ;  $x_3$  - длина разгонной трубки  $l_{mp} = 236\text{--}264 \text{ мм}$ ;  $x_4$  - диаметр разгонных трубок  $d_{mp} = 22\text{--}34 \text{ мм}$ . В качестве функций отклика, определяющих характер протекания процесса, выбраны: количество микроцемента, уловленного в циклоне  $Q_1$  (кг/ч); количество микроцемента, уловленного в рукавном фильтре  $Q_2$  (кг/ч); удельная поверхность конечного продукта  $S$  (см<sup>2</sup>/г).

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований, получены и проанализированы уравнения регрессии, осуществлен выбор рациональных параметров процесса измельчения цемента в пневмоструйной установке.

Уравнение регрессии в кодированных величинах, описывающее влияние исследуемых факторов на количество цемента, уловленного в циклоне  $Q_1$ , имеет вид:

$$\begin{aligned} Q_1 = & 72,856 + 0,303 \cdot x_1 - 0,725 \cdot x_2 + 0,576 \cdot x_3 + 0,767 \cdot x_4 - \\ & - 0,41x_1^2 - 0,66 \cdot x_2^2 - 0,385 \cdot x_3^2 - 0,785 \cdot x_4^2 - 0,4 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,375 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ & + 0,763 \cdot x_1 \cdot x_4 - 1,625 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,075 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,225 \cdot x_3 \cdot x_4 \end{aligned} \quad (34)$$

Используя уравнение (34) можно определить значимость варьируемых факторов на производительность циклона  $Q_1$  (рис. 7).

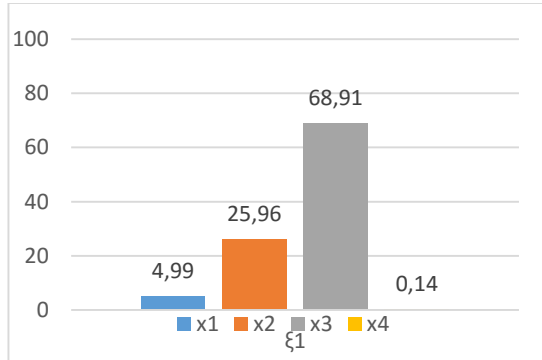


Рисунок 7. Диаграмма значимости варьируемых факторов на производительность циклона  $Q_1$

Анализируя диаграмму можно предположить, что массовая производительность циклона в силу противоточной конструкции помольной камеры в большей степени зависит от длины разгонных трубок, или же совокупности расстояния и скорости, на котором измельчаемый материал разгоняется, запасая кинетической энергией, до момента столкновения потоков аэрозвеси друг с другом. Достаточно высокую степень влияния числа оборотов ротора вентилятора на массовую производительность циклона можно объяснить зависимостью эффективности пылеочистки циклона от скорости в самом циклоне. Как известно, увеличение скорости в циклоне прямо пропорционально повышению эффективности улавливания.

Уравнение регрессии, описывающее влияние исследуемых факторов на количество цемента, уловленного в рукавном фильтре  $Q_2$ , имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Q_2 = & 14,04 + 0,382 \cdot x_1 - 0,953 \cdot x_2 + 0,514 \cdot x_3 + 1,24 \cdot x_4 + \\
 & + 0,225 \cdot x_1^2 - 0,575 \cdot x_2^2 - 0,625 \cdot x_3^2 - 1,325 \cdot x_4^2 - \\
 & - 0,025 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,638 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,113 \cdot x_1 \cdot x_4 - \\
 & - 0,3 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,05 \cdot x_2 \cdot x_4 + 1,375 \cdot x_3 \cdot x_4
 \end{aligned} \quad (35)$$

Используя уравнение (35) можно определить значимость варьируемых факторов на производительность рукавного фильтра  $Q_2$  (рис. 8).

Как видно из диаграммы, полученные значения влияния обуславливаются противоточной конструкцией мельницы, в которой дисперсность конечного продукта в большой степени зависит от длины разгонных трубок. Влияние числа оборотов ротора вентилятора можно



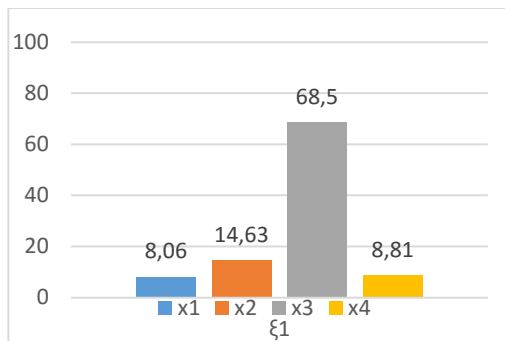


Рисунок 8. Диаграмма значимости варьируемых факторов на производительность рукавного фильтра  $Q_2$

объяснить тем, что на эффективность пылеочистки рукавного фильтра, не в последнюю очередь, влияет скорость движения воздуха в фильтре. Увеличение влияния числа оборотов ротора сепаратора на массовую производительность рукавного фильтра обуславливается тем, что с увеличением скорости ротора сепаратора возрастает количество частиц микроцемента, возвращающихся на домол. Значительно возросшее влияние диаметра разгонных трубок на эффективность пылеочистки в рукавном фильтре обуславливается увеличением объема ядра взаимодействия цемента при встречном столкновении струй, вытекающих из разгонных трубок, что способствует более интенсивному истиранию частиц и, как следствие, увеличению дисперсности конечного продукта.

Уравнение регрессии в кодированных величинах, описывающее влияние исследуемых факторов на количество цемента на общую удельную поверхность измельченного материала  $S$ , имеет вид:

$$\begin{aligned}
 S = & 12490,855 + 56,98 \cdot x_1 - 143,012 \cdot x_2 + 182,363 \cdot x_3 + 265,85 \cdot x_4 + \\
 & + 136,387 \cdot x_1^2 - 304,246 \cdot x_2^2 - 44,667 \cdot x_3^2 - 421,781 \cdot x_4^2 - \\
 & - 20,813 \cdot x_1 \cdot x_2 + 198,188 \cdot x_1 \cdot x_3 + 3,938 \cdot x_1 \cdot x_4 - \\
 & - 77,438 \cdot x_2 \cdot x_3 - 37,438 \cdot x_2 \cdot x_4 + 36,063 \cdot x_3 \cdot x_4
 \end{aligned} \quad (36)$$

Используя уравнение (36) можно определить значимость варьируемых факторов на удельную поверхность  $S$  (рис. 9).

Из диаграммы можно сделать вывод, что для эффективной работы пылеочистного оборудования, необходимо соблюдение оптимальных скоростей пылеосадительного тракта. На эффективность измельчения или же на обеспечение максимальной дисперсности продукта влияет длина разгонных трубок, в силу противоточной конструкции мельницы. Влияние числа оборотов ротора сепаратора на дисперсность продукции

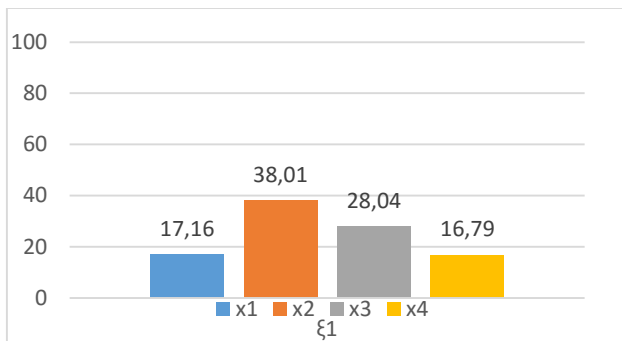


Рисунок 9. Диаграмма значимости варьируемых факторов на удельную поверхность  $S$

обуславливается возвратом частиц на домол в случае увеличения числа оборотов ротора сепаратора. Влияние диаметра разгонных трубок обуславливается увеличением объема ядра взаимодействия цемента при встречном столкновении струй, вытекающих из разгонных трубок, что способствует более интенсивному истиранию частиц и как следствие увеличению дисперсности конечного продукта.

На основании уравнений регрессии (34) – (36) изучено исследуемых параметров ( $n_1$ ,  $n_2$ ,  $l_{mp}$ ,  $d_{mp}$ ) на количество микроцемента, уловленного в циклоне  $Q_1$  (кг/ч), количество микроцемента, уловленного в рукавном фильтре  $Q_2$  (кг/ч) и удельную поверхность конечного продукта  $S$  (см<sup>2</sup>/г). Установлено, что для любого набора входных параметров  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $l_{mp}$ ,  $d_{mp}$  существует предпочтительное их сочетание:  $n_1 = 1700$  мин<sup>-1</sup>;  $n_2 = 2510-2810$  мин<sup>-1</sup>;  $l_{mp} = 250-260$  мм;  $d_{mp} = 28-32$  мм, когда количество микроцемента, уловленного в циклоне, количество микроцемента, уловленного в рукавном фильтре и удельная поверхность конечного продукта стремятся к максимуму.

**В пятой главе** приведены данные по промышленному внедрению опытно-промышленного образца пневмоструйной мельницы в условиях ЗАО «Петрохим» (г. Белгород).

При эксплуатации установки были получены высокие результаты по удельной поверхности измельчаемого материала. Так, для цемента, уловленного в циклоне СЦН-40-300 удельная поверхность составила свыше 12000 см<sup>2</sup>/г, а для цемента, уловленного в рукавном фильтре удельная поверхность составила более 16000 см<sup>2</sup>/г. Полученные результаты конечного продукта удовлетворяют ТУ 2458-066-54651030-2010 «Цементная смесь для тампонажного раствора на углеродной основе ЦС БТРУО марка «Микро» до 5 мкм» для производства эмульсионного

тампоначного раствора на углеводородной основе №0002557268 ЗАО «Химеко-ганг». Расчетный годовой экономический эффект от внедрения пневмоструйной мельницы составил 7 155 тыс. руб.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании анализа направлений развития и совершенствования техники и технологии измельчения выявлено, что наиболее перспективными аппаратами, находящими в последнее время все большее и большее применение, являются мельницы струйной энергии.

2. Предложена новая патентно-чистая конструкция пневмоструйной мельницы, предназначенной для получения микроцемента.

3. Получена математическая зависимость, позволяющая определить максимальную объемную пропускную способность разгонных трубок для предложенной конструкции мельницы.

4. Выведено математическое выражение для определения установившегося режима работы пневмоструйной мельницы согласованного с устойчивой подачей измельченного материала вибропитающим устройством.

5. Аналитически описаны колебательные движения частицы материала относительно плоскости встречи двух струй в пределах зоны разрушения в помольной камере.

6. Получено соотношение, определяющее время нахождения частицы в области косых соударений частиц материала с частицами, находящимися во встречной струе в пределах зоны разрушения.

7. Установлены выражения, описывающие закономерность изменения частиц материала при косых соударениях и значение коэффициента истирания в рассматриваемых условиях работы установки.

8. В качестве основного плана эксперимента выбран центральный композиционный ортогональный план (ЦКОП)  $2^4$  полного факторного эксперимента, определены исследуемые факторы и уровни их варьирования. Экспериментально исследовано влияние варьируемых параметров на производительность технологического комплекса и на качество конечного продукта. Получены уравнения регрессии для  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $S = f(n_1, n_2, l_{mp}, d_{mp})$  при работе пневмоструйной установки.

9. Выявлены закономерности влияния исследуемых параметров: числа оборотов ротора сепаратора мельницы  $n_1$ , мин<sup>-1</sup>; числа оборотов ротора вентилятора  $n_2$ , мин<sup>-1</sup>; длин разгонных трубок  $l_{mp}$ , мм; диаметров разгонных трубок  $d_{mp}$ , мм на функции отклика, определяющие характер протекания процесса: количество измельченного порошка, уловленного в циклоне  $Q_1$  (кг/ч); количество порошка, уловленного в фильтре  $Q_2$  (кг/ч);

удельная поверхность конечного продукта  $S$  (см<sup>2</sup>/г). Установлена общая область расположения оптимумов по выходным параметрам, что подтверждается адекватностью квадратичных моделей.

10. На основании полученных уравнений регрессии осуществлен выбор рациональных параметров конструкции и технологических режимов работы установки при условиях, когда выполняются требования ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $S$ ) стремятся к *max*. Таковыми установлены  $n_1 = 1700$  мин<sup>-1</sup>;  $n_2 = 2510-2810$  мин<sup>-1</sup>;  $l_{mp} = 250-260$  мм;  $d_{mp} = 28-32$  мм.

11. Изготовлен опытно-промышленный образец пневмоструйной установки для получения микроцемента. Проведены его промышленные испытания на ЗАО «Петрохим», которые показали результаты по тонкости помола удовлетворяющие требованиям к цементной смеси по ТУ 2458-066-54651030-2010, входящей в состав тампонажного раствора на углеродной основе ЦС БТРУО марка «Микро» до 5 мкм, используемого для производства эмульсионного тампонажного раствора на углеводородной основе №0002557268 ЗАО «Химико-ганг».

***Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:***

а) в изданиях, индексируемых базой данных Scopus:

1. Uvarov, V.A. The counterflow mixer for receiving the disperse reinforced composites / Uvarov V.A., Klyuev S.V., Orekhova T.N., Klyuev A.V., **Sheremet E.O.**, Durachenko A.V. // Research Journal of Applied Sciences. Volume 9, Number 12 (2014), pp. 1211-1215.

2. Uvarov, V.A. Mathematical models describing the motion of the air material flow / Uvarov V.A., Orekhova T.N., Uralskij A.V., Durachenko A.V., **Sheremet E.O.** // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. ISSN 0973-1768 Volume 11, Number 6 (2015), pp. 5145-5152.

3. **Sheremet, E.O.** Efficiency of dust separating devices in ventilation emission cleaning system / Sheremet E.O., Seminenko A.S., Goltsov A.B., Podporinov B.F., // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 327(2018) 042081. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 - Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment" 2018.

б) в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

4. Уваров, В.А. Анализ оборудования для тонкого измельчения / В.А. Уваров, Т.Н. Орехова, **Е.О. Шеремет** // Научный альманах. – 2016. - № 10-3 (24). С. 145-147.

5. Уваров, В.А. Исследование производства сухих многокомпонентных смесей / В.А. Уваров, Т.Н. Орехова, **Е.О. Шеремет** // Научный альманах. – 2016. - № 10-3 (24). С. 316-319.

6. Уваров, В.А. Перспективы развития смесителей для пневматической гомогенизации сыпучих материалов / В.А. Уваров, Т.Н. Орехова, **Е.О. Шеремет** // Научный альманах. - 2016 - № 10-3 (24). С. 320-322.

7. Овчинников, Д.А. Моделирование процесса сепарации цемента / Д.А. Овчинников, В.А. Уваров, **Е.О. Шеремет** / Механизация строительства. - 2017. - №12. С. 34 – 38.

8. Уваров, В.А. Вычисление пропускной способности разгонной трубки эжекторного узла пневмоструйной установки / В.А. Уваров, Ю.Ю. Старчик, **Е.О. Шеремет** // Строительные и дорожные машины. - 2018. - № 10. С. 22-25.

в) в других изданиях:

9. **Шеремет, Е. О.** Расчет пылесадительного тракта пневмоструйной установки для получения высокодисперсных порошков/ Шеремет Е. О., Овчинников Д.А., Орехова Т.Н. // [Электронный ресурс]/ Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова - Белгород, 2017.

10. **Шеремет, Е.О.** Особенности получения и применения тампонажных цементов / Е.О. Шеремет // II Всероссийская научно-техническая конференция «Механизация и автоматизация строительства». Сборник статей. - Самара, 2018. С 33-37.

11. Орехова, Т.Н. Машины для измельчения: мельницы и дробилки/ Орехова Т.Н., **Шеремет Е. О.**, Окушко В.В., Стрыжаков С.Д. // [Электронный ресурс]/ Материалы IV Международной научно-технической конференции «Энергетические системы (ICES-2019)».- Белгород, 2019.

12. Патент на полезную модель РФ №174065. Струйная мельница тонкого помола. Уваров В.А., Орехова Т.Н., Леонов А.Н., Булгаков С.Б., **Шеремет Е.О.** Оpubл. 28.09. 2017. Бюл. №28.

### *Условные обозначения*

- $M_T$  – пропускная способность разгонной трубки  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $V_m$  – объем цемента в разгонной трубке,  $\text{м}^3$ ;  
 $t$  – текущее значение времени, с;  
 $P$  – давление в сопле, МПа;  
 $P_0$  – давление в камере, МПа;  
 $\rho$  – плотность воздуха в камере,  $\text{кг}/\text{м}^3$   
 $T$  – температура по шкале Кельвина,  $K$ ;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{кг}/K)$ ;  
 $\varphi_0$  – коэффициент скорости;  
 $l_{\text{тр}}$  – длина разгонной трубки, мм;  
 $d_{\text{mp}}$  – диаметр разгонной трубки, мм;  
 $\bar{P}$  – вес выделенной порции цемента;  
 $N$  – величина силы нормального давления;  
 $f$  – коэффициент трения;  
 $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  
 $\vec{e}$  – единичный вектор в направлении действия вибрации;  
 $M_m$  – масса выделенной порции цемента.  
 $K$  – коэффициент пропорциональности;  
 $n_0$  – число разгонных трубок;  
 $d_x$  – текущее значение диаметра частицы цемента, мм;  
 $\beta$  – доля частиц, участвующих в колебательном движении;  
 $t_0$  – время пребывания в области, где проходят косые соударения, с;  
 $\lambda_0$  – коэффициент пропорциональности;  
 $d_0$  – начальное значение диаметра частицы цемента, мм;  
 $d_k$  – конечное значение диаметра частицы цемента, мм;