

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

на правах рукописи

Шермет Евгений Олегович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОСТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОЦЕМЕНТА**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук, профессор
Уваров В.А.

Белгород - 2019 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Введение.....	5
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ ДЛЯ ТОНКОГО И СВЕРХТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЦЕМЕНТА	
1.1. Микроцементы. Назначение, применение, преимущества	10
1.2. Тампонажные цементы и их применение	12
1.3. Анализ помольного оборудования для получения микроцементов	15
1.4. Струйные мельницы	29
1.5. Основные теоретические положения расчета параметров эжекторных струйных мельниц	37
1.6. Предлагаемое конструктивно-технологическое решение установки для помола цемента	41
1.7. Цель и задачи исследований	44
1.8. Выводы.....	44
2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМОСТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЫ.....	
2.1. Вычисление пропускной способности разгонной трубки эжекторного узла	46
2.2. Определение условий установившегося режима работы пневмоструйной мельницы	49
2.3. Движение частиц цемента в области взаимодействия встречных струй	56

2.4. Разрушение частиц цемента при косых соударениях в области встречных струй	63
2.5. Анализ результатов расчета режимов работы пневмоструйной мельницы	64
2.6. Выводы	67
3. ПЛАНИРОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	68
3.1. Планирование экспериментальных исследований	68
3.2. Оборудование для экспериментальных исследований и средства контроля	72
3.3. Методика проведения экспериментальных исследований и измерений	75
3.4. Характеристика исходного сырья	79
3.5 Выводы	81
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЦЕМЕНТА В ПНЕВМОСТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЕ	82
4.1. Получение уравнений регрессии, описывающих зависимость Q_1, Q_2, S от варьируемых факторов	82
4.2. Исследование парного влияния изменяемых факторов на эффективность процесса измельчения в пневмоструйной установке	91
4.3. Определение рациональных параметров процесса измельчения цемента в пневматической установке	103
4.4. Выводы	110
5. ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ	111

5.1. Описание промышленного комплекса	111
5.2. Размещение мельницы и вспомогательного оборудования	112
5.3. Пуск комплекса в работу и остановка комплекса	113
5.4. Расчет экономической эффективности	114
Выводы.....	116
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	117
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	120
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	134

ВВЕДЕНИЕ

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. Основная характеристика микроцемента – тонкость помола, которая имеет основное значение при твердении цемента в первые минуты и часы схватывания. На современном отечественном оборудовании не всегда возможно получить достаточную тонкость помола, а зарубежные 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 не высоких 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, которые позволяют определить рациональные режимы процесса измельчения в установке предложенной конструкции.

Практическая значимость работы заключается в создании математических 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 рецензированных 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 наименований и 8 страниц приложений.

1. МИКРОЦЕМЕНТЫ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ ДЛЯ ИХ ПОМОЛА

1.1. Микроцементы. Назначение, применение, преимущества

Сравнительно недавно производители строительных материалов предложили потребителям абсолютно новую разновидность строительного материала – микроцемент, который благодаря своим высоким потребительским свойствам стал активно завоевывать рынок и широко применяться в практике строительства. По сути, микроцемент – это высокодисперсное вяжущее, размер частиц и состав которого варьируется в зависимости от цели использования. В качестве главных компонентов при изготовлении подобного материала обычно выступает доизмельченный до высокой степени традиционный цемент, а также несколько видов специальных полимеров и различных красителей. При необходимости в материал добавляют кварц, что позволяет готовому изделию «дышать». На основе этих компонентов получают обширный ассортимент всевозможных смесей, различающихся по своему назначению, области применения, цвету и оттенкам.

Благодаря мельчайшему размеру зерен, высокой текучести и низкой вязкости в растворах с жидкостями, микроцемент способен проникать в мельчайшие трещины, поры, заполнять пространства между зернами горных пород и минералов. Исходя из этого, можно перечислить следующие его основные сферы применения в строительстве и промышленности:

- в смесях для внутренних отделочных работ в помещениях самого различного типа при облагораживании, как поверхностей потолков, так и стен;
- для усиления конструкций путем заполнения трещин и пор с целью восстановления прочности бетонных, керамических, растворных изделий;
- для восстановления фундаментов различного типа и предотвращения фильтрации воды;
- при строительстве подземных сооружений;

- для повышения несущей способности, предотвращения осыпания и размыва грунтов путем инъецирования;

- для ускорения процесса твердения композиций на обычном портландцементе;

- при проходке скважин и для ремонтно-изоляционных работ в них и в ряде других случаев.

Исследователи и потребители отмечают следующие преимущества использования микроцемента:

- экологическая чистота и безопасность применения;

- высокая сочетаемость с бетонами; однородность с цементами;

- обеспечение прочности без негативного влияния на конструкцию фундаментов сооружений;

- высокая водонепроницаемость уплотненных грунтов и конструкций из бетона;

- увеличенный срок службы укрепленных конструкций;

- простота в приготовлении суспензии и распылении инъекций;

- экономичное потребление материала с помощью регулирования водоцементного отношения.

Что касается непосредственно процесса изготовления микроцемента, то, как утверждают производители, данная процедура осуществляется только исключительно по новым инновационным методикам и на особом оборудовании, которое как раз и позволяет создавать специальную смесь, способную обеспечивать максимально надежное сцепление при монтаже практически любых материалов [1-3].

Поскольку производство микроцементов на основе обычных портландцементов достаточно распространено и хорошо освоено для удовлетворения спроса рынка широко используемых строительных смесей, в настоящей работе наше внимание было сосредоточено на тампонажных микроцементах, как менее изученных со стороны технологических и технических аспектов их получения при высокой потребности применения.

1.2. Тампонажные цементы и их применение

Основные свойства цемента, такие как скорость твердения, прочность определяются не только его химическим и минералогическим составом, но и в большей степени дисперсностью, гранулометрическим составом и формой частиц порошка.

Повышение прочности цемента в первые сроки твердения в значительной степени обуславливается именно тонкостью помола – исключительно важным параметром при производстве тампонажного цемента.

Тампонажный цемент – одна из разновидностей портландцемента, с повышенными требованиями к минералогическому составу клинкера, используемого для изоляции подземных сооружений различного назначения и скважин при добыче нефти и газа от давления грунтовых вод. Так же используется при разведочном и эксплуатационном бурении нефтяных и газовых скважин, и при капитальном ремонте скважин, целью которого является изолирование продуктивных нефтеносных слоев от водоносных, а также отделение нефтеносных слоев друг от друга при залежах межпластовых вод.

Существует ряд важнейших требований к качеству тампонажного цемента:

- достаточная текучесть цементного раствора, способствующая его закачиванию в колонны, а затем продавливанию в затрубное пространство;

- необходимая прочность в первые двое суток твердения, которая должна обеспечить закрепление колонны в стволе скважины, устойчивость при разбурировании и перфорации; прочность должна составлять не менее 2,3 МПа при коэффициенте запаса прочности в 2-5 раз выше нормативного;

- эффективная изоляция от проницаемых пород, чтобы защитить продуктивные нефтяные пласты от пластовых вод и обсадную колонну от проникновения корродирующих жидкостей, которые могут содержать большое количество различных солей;

- стойкость цементного камня по отношению к агрессивным пластовым водам [4].

На территории России существуют различные предприятия, которые занимаются выпуском тампонажного цемента, такие как ОАО «Сухоложскцемент» (Свердловская обл.), ЗАО «Строительные материалы (Республика Башкортостан), ООО «Топкинский цемент» (Кемеровская область).

Однако в настоящее время все больше нарастает необходимость в производстве и применении новых тампонажных смесей с улучшенными свойствами.

Основная добыча нефти и газа ведется из месторождений, находящихся в эксплуатации около 30-50 лет, и, как правило, на завершающих стадиях эксплуатации месторождений возникают следующие проблемы:

- нарушение герметичности обсадных колонн из-за коррозии по резьбовым соединениям и другим дефектам колонн;
- рост обводненности добываемой продукции;
- нарушение целостности цементного камня, с образованием межпластовых перетоков нефти, воды и газа.

Перечисленные факторы указывают на необходимость проведения ремонтно-изоляционных работ (РИР) по устранению заколонных перетоков и герметизации эксплуатационных колонн.

На практике, при проведении ремонтно-изоляционных работ с использованием тампонажного раствора на основе обычного тампонажного цемента эффективность таких работ снижается, так как цемент состоит из достаточно крупных частиц, которые физически не могут проникнуть в микротрещины.

Для герметизации нарушений и ликвидации заколонных перетоков в условиях низкой скорости закачки цемента в скважину, в последнее время все чаще используются тампонажные растворы приготовленные на основе микроцемента. Так как микроцементы содержат достаточное количество частиц малого диаметра получаемые растворы обладают повышенной проникающей способностью, по сравнению с обычными тампонажными растворами, приближающейся по своим свойствам к бездисперсным растворам. При этом необходимо подчеркнуть, что на

глубину проникновения частиц цемента в пористую среду определяющее значение имеет не средний размер частиц, а максимальный наименьший размер частиц, который определяет глубину проникновения [5].

Для сравнения: размер частиц обычного тампонажного цемента составляет 40-60 мкм, тампонажного микроцемента – менее 15 мкм. Содержание в растворе большого количества цементных частиц малого размера (до 95% от общего количества) представляет собой необходимое условие. Если концентрация будет значительно меньше, закачать раствор в трещину не удастся, поскольку в этом случае будет происходить блокировка мелких частиц более крупными

Таким образом, микроцементы, применяемые для ремонтно-изоляционных работ, должны обладать следующими преимуществами в отличие от обычных тампонажных цемента:

- тонкость помола, обеспечивающая высокую удельную поверхность ($S_{уд}$ более $800 \text{ м}^2/\text{кг}$), с распределением частиц $d_{(095)}$ в районе 10-20 мкм и менее;
- высокая седиментационная устойчивость цементного раствора;
- повышенная проникающая способность в пористую среду;
- возможность управления технологическими свойствами цементного раствора с помощью химических реагентов.

На сегодняшний день главная проблема заключается в производстве тампонажного микроцемента, потому что не каждое оборудование способно обеспечить тонкость помола менее в указанных пределах. По этой причине основные поставщики микроцемента – страны зарубежья (таблица 1.1).

Возрастающая потребность получения тампонажного микроцемента высокого качества, с возможностью корректировки основных его характеристик, заставляет искать наиболее эффективные приемы измельчения. Кроме того, понятно, что крупные производители тампонажного цемента не должны, и по ряду причин не могут удовлетворить производственные нужды в потребности микропорошков.

В сложившейся ситуации цементные заводы будут использоваться как производители рядового продукта, который будет являться сырьем для получения вяжущих веществ заданных характеристик, а работы по домолу тампонажного

цемента (получение микроцемента) необходимо проводить на специализированных участках в условиях получения материала заданных свойств в ограниченных объемах.

Таблица 1.1 - Производители и марки микроцементов с характеристиками

№ п/п	Страна производитель, фирма	Марка микроцемента	Максимальный размер частиц, мкм/Суд, м ² /кг.
1	Германия, Дюккерсдоф	Mikrodur	6/1600
2	Франция	Spinor	12/1000
3	БАСФ	Rheocem	8/900
4	Финляндия	Микроцемент СТ	20/500
5	РФ, РХТУ имени Д.И. Менделеева	Интрацем	6/1000
6	РФ, РГУНГ имени И.М. Губкина и ЗАО «Химеко-ГАНГ»	Цементная смесь «ЦС БТРУО МИКРО»	5/1750

И лучше всего это делать в непосредственной близости от его места использования, устраняя длительное хранение конечно продукта. Это исключит его слеживаемость и потерю качества ряда параметров, характерных для микроцементов, таких как изолирующая способность, водоотдача, пластическая вязкость, время загустевания, прочность цементного камня и проникающая способность в грунт.

Существующее современное оборудование для получения микроцемента не всегда предоставляет такую возможность и требует доработки. Рассмотрим отдельные виды помольного оборудования, применение которых возможно для получения порошков микроцемента.

1.3. Анализ помольного оборудования для получения микроцементов

Исходя из вышесказанного, следует, что тонкость помола получаемого порошка микроцемента в значительной мере определяет качество получаемых на его основе продуктов. Кроме того, необходимо учитывать, что помол является весьма энергозатратным технологическим процессом. Так, в цементной промышленности общие затраты энергии на производство 1 тонны цемента составляет в среднем 110-130 кВт/ч, в том числе на помол клинкера и сырья 58-65 кВт/ч, т.е. более 50% [6]. Вследствие этих причин является актуальным поиск новых энергосберегающих технологий помола и разработка высокоэффективного оборудования.

Традиционным оборудованием для измельчения являются шаровые мельницы (рисунок 1.1), доминирующие на сегодняшний день в технологии измельчения.



Рисунок 1.1 - Схема работы шаровой мельницы

В данных мельницах материал измельчается внутри полого вращающегося барабана. При вращении мелющие тела и измельчаемый материал сначала движутся по круговой траектории вместе с барабаном, а затем в зависимости от режима движения падают по параболе или скатываются по загрузке, движущейся вверх. Материал внутри мельницы измельчается в результате попадания в зону действия ударных нагрузок, которые возникают при соударении мелющих тел между собой и с футеровкой, и истирающих нагрузок при относительном перемещении измельчающих поверхностей.

Эти мельницы имеют значительную производительность, высокий коэффициент использования, просты в эксплуатации и обслуживании, обеспечивают требуемое распределение частиц по их размеру в измельченном материале. Они применяются для измельчения материалов с различными физико-механическими свойствами и допускают подачу достаточно крупных кусков, достигающих $(40...45) \cdot 10^{-3}$ м.

Однако при измельчении в трубных шаровых мельницах лишь малая часть энергии затрачивается на помол, большее количество энергии теряется на износ и нагрев измельчающей среды. Расход энергии в помольной установке зависит от следующих факторов:

1. Технологической схемы помола и компоновки помольной установки.
2. Свойств исходного материала и требований к готовому продукту.
3. Конструкции и условий эксплуатации измельчающей среды установки.
4. Эксплуатационного режима помольной установки.

Главным недостатком применения трубных шаровых мельниц, работающих в открытом цикле измельчения (рисунок 1.2), при производстве микропорошков - технологическая сложность и практическая невозможность получения порошков с размером частиц менее 5 мкм, поэтому в настоящее время ведется активная деятельность по компоновочным решениям оснащения таких высокоэффективными сепараторами с организацией замкнутого цикла измельчения (рисунок 1.3).

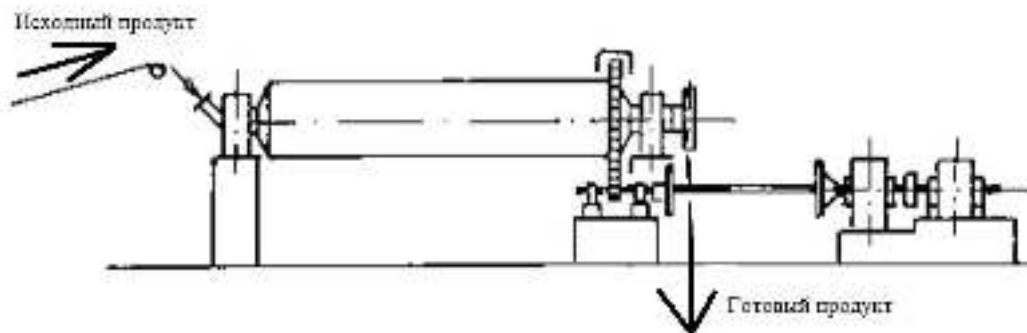


Рисунок 1.2 - Схема измельчения в шаровой мельнице, работающей по открытому циклу

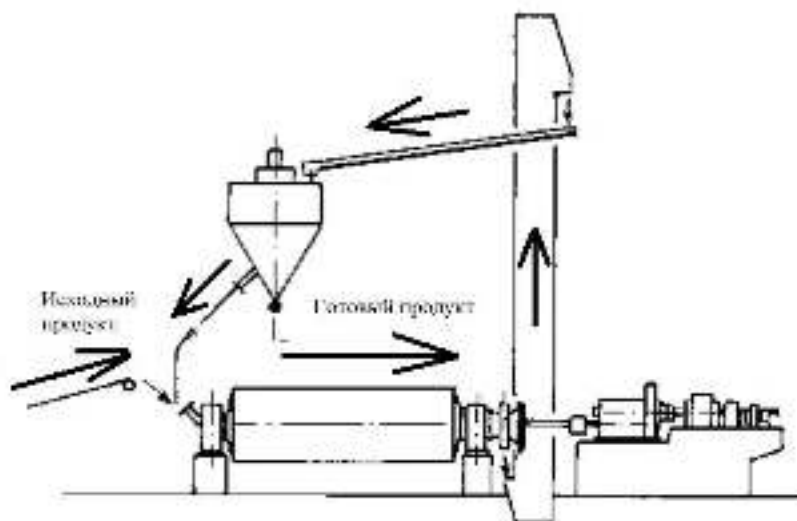


Рисунок 1.3 - Схема измельчения в шаровой мельнице, работающей по замкнутому циклу

Это способствует повышению эффективности работы трубных шаровых мельниц, что позволяет снизить размер удельных энергозатрат на 15-30% и повысить производительность агрегата на 20-30% на фоне повышения удельной поверхности готового продукта. Однако следует заметить, что помольные установки замкнутого цикла измельчения эксплуатационно и конструктивно сложнее, а также требуют использования дополнительного оборудования, потребляющего электроэнергию.

В настоящее время достаточно широко используются среднеходные мельницы: тарельчато-валковые, шаровые и роliko-маятниковые (рисунок 1.4). В основе их работы лежит принцип раздавливания, по этой причине в зоне измельчения возникают огромные нагрузки, вследствие чего снижается удельных расход энергии на 10-30% по сравнению с шаровыми мельницами.

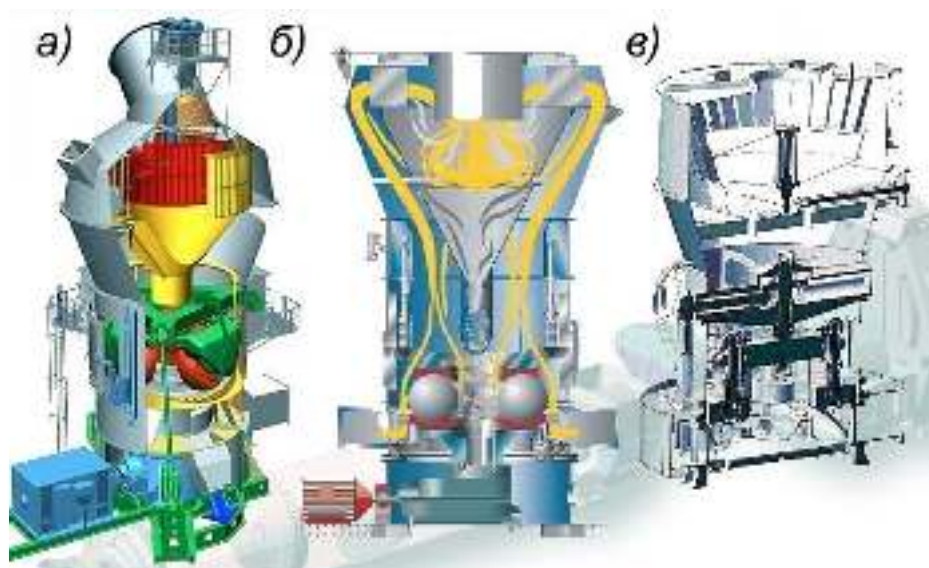


Рисунок 1.4 - Общий вид: а) - тарельчато-валковой, б) - шаровой и в) - ролико-маятниковой мельниц

Однако, вследствие ряда причин, о которых будет сказано ниже, данный тип мельниц целесообразно использовать только на первой стадии измельчения, а конечный помол осуществлять в мельницах сверхтонкого измельчения [7,8].

В силу конструктивных особенностей тарельчато-валковые и ролико-маятниковые измельчители имеют ряд недостатков, сдерживающих их широкое распространение. К недостаткам относятся: низкая эксплуатационная надежность из-за частой поломки тяжело нагруженных подшипников опор; восприимчивость к попаданию в измельчаемый материал инородных тел, включая металлические, что обуславливает установку магнитных сепараторов перед мельницами. Мельницы данного типа работают только в замкнутом цикле с воздушными классификаторами, усложняя конструкцию, эксплуатацию и повышая трудоемкость ремонтов. Кроме того, сепаратор и вентиляционная установка высокого давления потребляют до 40% расходуемой энергии. Тем не менее, работы по совершенствованию среднеходных мельниц активно продолжаются исследователями и конструкторами многих промышленно развитых стран [9-14].

В горнорудной, строительной и других отраслях промышленности ряда стран все большее распространение находят прессвалковые измельчители (рисунок 1.5), которые предназначены для помола хрупких материалов

(известняк, различные руды, клинкер, доменный шлак). Они используются как в составе различных помольных комплексов на базе трубных шаровых мельниц, где прессвалковые измельчители используются в качестве предварительной стадии помола, так и в составе более эффективных помольных комплексов – в качестве основного оборудования для предварительного и окончательного помола материалов [15].

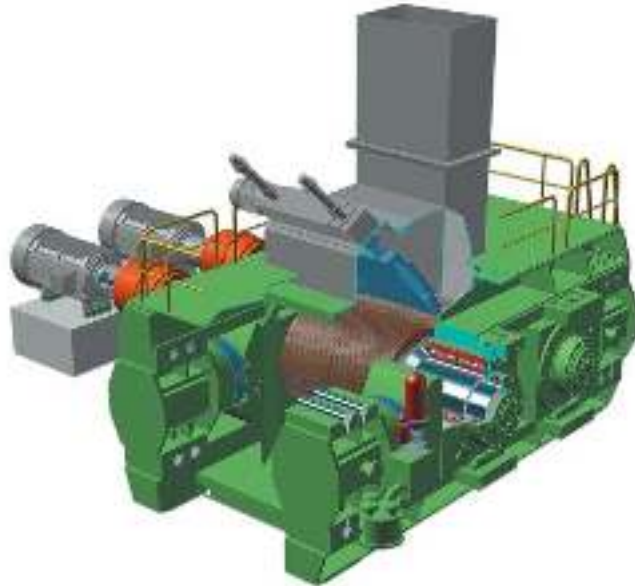


Рисунок 1.5 - Общий вид прессвалкового измельчителя

Помол в прессвалковых измельчителях осуществляется при высоких давлениях в пространстве между двумя валками, вращающимися навстречу друг другу. Этот тип оборудования имеет достаточно удачную компоновку, относительно невысокий удельный расход энергии, им присущи высокая производительность, небольшое занимаемое пространство, малое количество производимого шума. Производительность, равно как и тонкость получаемого продукта, данного типа агрегатов можно повысить в 2-3 раза, путем совместного их использования в составе помольных комплексов с сепаратором, работающим по замкнутому циклу, и далее трубной шаровой мельницы домола.

Из недостатков прессвалковых измельчителей можно выделить: сложность при эксплуатации; высокий абразивный износ валков при использовании в

конструкциях очень высоких давлений; возникновение краевого эффекта, влияющего на неравномерное распределение частиц в материале [16].

Вышеперечисленные типы агрегатов используют раздавливание и истирание как основной способ разрушения. Но в классе измельчителей существуют ещё и роторные, молотковые и центробежно-ударные мельницы, которые реализуют способ разрушения материалов, получивший название «свободного удара». В роторных и молотковых мельницах измельчение происходит путем соударения измельчаемых частиц с движущимся ударным элементом, а в центробежно-ударных мельницах (рисунок 1.6) – в результате удара материала о неподвижную массивную преграду [17].

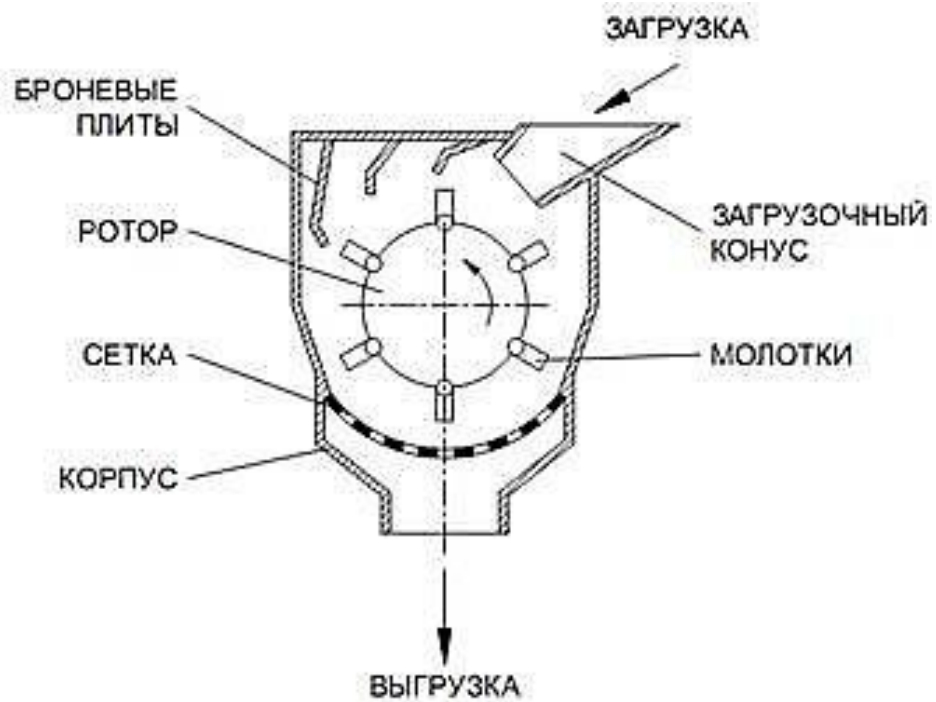


Рисунок 1.6 - Схема ударно-центробежной мельницы

Дезинтегратор (рисунок 1.7) – один из представителей класса измельчителей различных сыпучих материалов многократными свободными ударами. Этот тип измельчителей позволяет перерабатывать материалы с начальной крупностью до 10 мм при скорости соударения до 300 м/с. Частота вращения ротора при этом может достигать 12000 об/мин, а производительность до 80 т/ч при потребляемой мощности до 600 кВт [18,19].

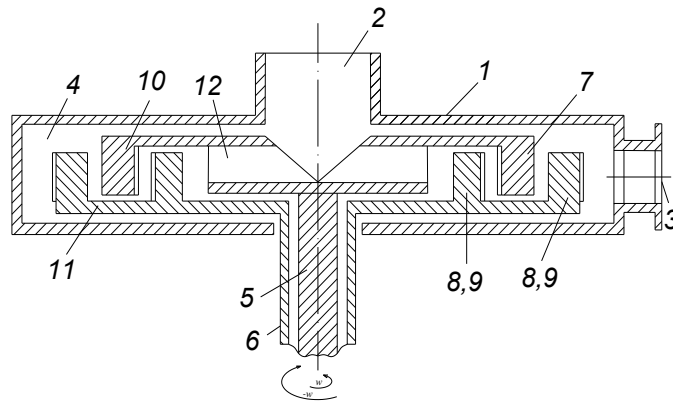


Рисунок 1.7 - Схема дезинтегратора

1 – корпус; 2 – отверстие для подачи материала; 3 – выгрузка; 4 – зона измельчения;
 5, 6 – противоположно вращающиеся роторы; 7,8,9,10,11 – ударные элементы;
 12 – разбрасывающий патрубок

Основные недостатки данного вида оборудования – низкая надежность при высокоскоростном режиме работы ротора, существенная выработка рабочих органов и, как следствие, загрязнение частицами износа готового продукта. Как и в случае со среднеходными мельницами, дезинтегратор может выйти из строя при попадании в него металлических предметов и крупных кусков прочных материалов [20,21].

В настоящее время при измельчении материалов различной твердости в различных отраслях производства получили распространение вибрационные мельницы. Вибрационная мельница состоит из камеры с мелющими телами и измельчаемым материалом. Измельчение происходит в результате вибрационного движения камеры, при возникновении высоких механических напряжений между мелющими и измельчаемыми телами, что приводит к изменению структуры измельчаемого материала.

Амплитуда колебаний вибромельниц может варьироваться в пределах от 1,7 до 4 мм, а частота – от 1500 до 3000 колебаний в минуту. Производительность вибромельниц средней и высокой мощности может достигать свыше 1т/ч при удельных затратах электроэнергии 40-60 кВт•ч/т [22].

В свободном доступе [23-26] можно встретить рекламу об изготовлении вибрационных мельниц МВ (рисунок 1.8). Данные мельницы позволяют

достаточно быстро получать порошок требуемой дисперсности, в том числе выполнять тонкий и сверхтонкий помол до 1 мкм.



Рисунок 1.8 - Общий вид вибрационной мельницы MB-70

Мельница работает в периодическом режиме. В установленную на пружинных опорах размольную камеру загружаются шары (~80% от объема) и материал. При вращении дебалансного вала размольная камера приводится в круговое колебательное движение и ее стенки сообщают шарам частые импульсы: шары подбрасываются, сталкиваются, совершают отраженные броски, вращаются (основное воздействие на материал - истирание). При этом шары и материал вращаются в сторону, противоположную направлению вращения дебалансного вала. Высокая частота колебаний и разнообразный характер воздействий шаров на материал создают усталостный режим - слабые места, всегда имеющиеся в структуре твердых материалов, еще более ослабляются и разрушение частиц происходит по этим местам. Размольная камера оснащена рубашкой для подачи охлаждающей воды, потому что в процессе размолла происходит нагрев. Выгрузка материала выполняется ручным поворотом размольной камеры грузочным лючком в нижнее положение. Для отделения мелющих тел от материала на грузочный лючок устанавливается решетка» [24].

Исследования вибромельниц доказывают целесообразность их применения для получения микропорошков, но и они имеют перечень недостатков, например,

достаточно невысокую производительность, которая связана с трудностью передачи высокочастотной вибрации на большие массы шаров [27-30].

К одному из подвидов шаровых мельниц относятся планетарные мельницы, созданные во второй половине 20 века. Данный тип мельниц (рисунок 1.9) может обеспечивать высокую дисперсность конечного продукта свыше 5 мкм, однако в силу сложности конструкции и большой металлоемкости конструкции, и как следствие больших знакопеременных воздействий на вращающийся механизм и корпуса помольных блоков, данный вид мельниц широкого распространения не получил.

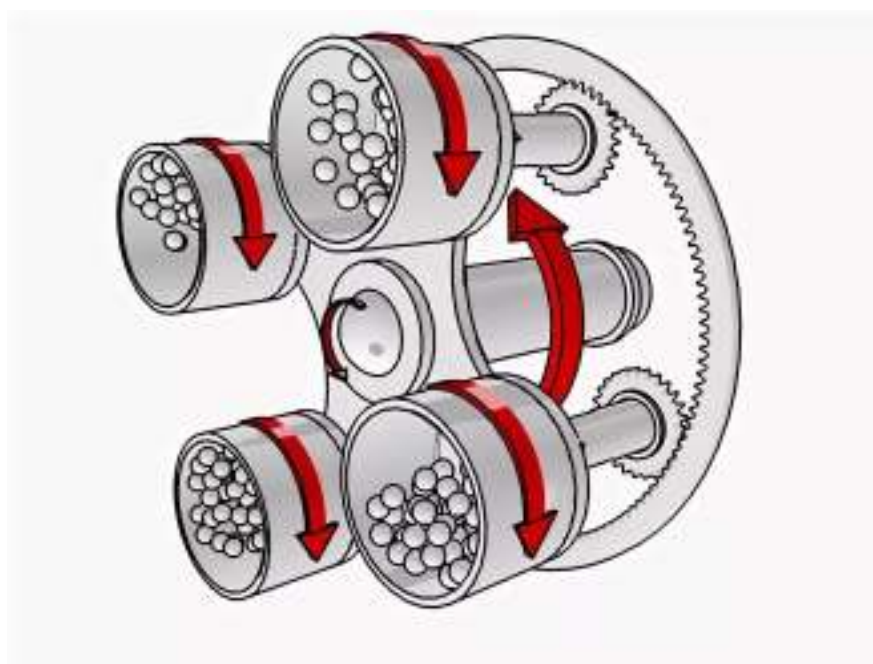


Рисунок 1.9 - Схема работы планетарной мельницы

Вихревые мельницы (рисунок 1.10) – один из типов оборудования относящийся к классу измельчителей ударно-истирающего действия и пригодный для производства тонких порошков. В качестве их плюсов можно выделить обширную область применения, возможность реализации периодического и непрерывного режима работы, а также небольшие габариты установок [31-35].

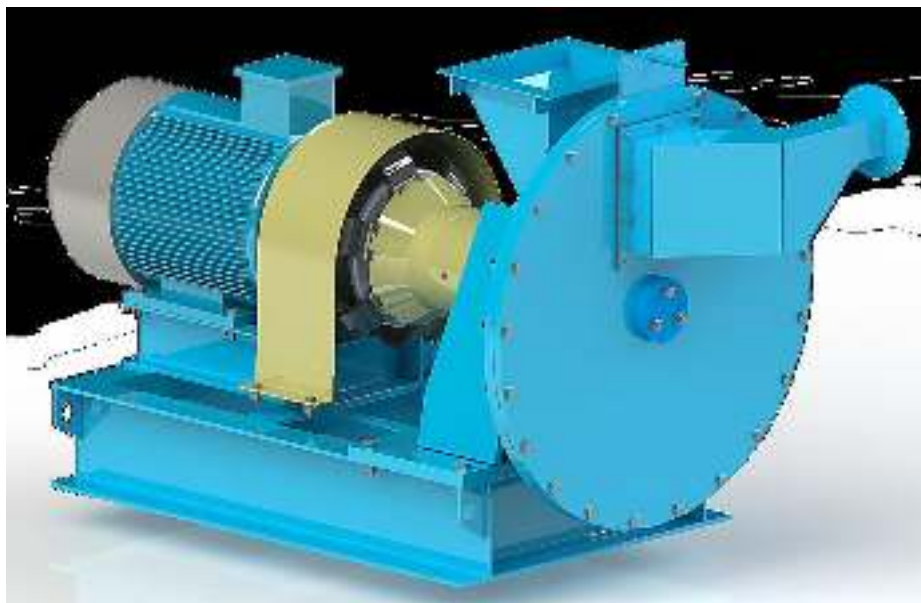


Рисунок 1.10 - Общий вид вихревой мельницы

Измельчение в оборудовании данного типа осуществляется за счет использования сильной турбулентности аэровзвеси измельчаемого материала внутри помольной камеры. Так как любой нагрев, вызванный быстрым измельчением, рассеивается в воздухе, в помольных аппаратах данного типа можно сочетать процесс одновременного измельчения и сушки, при использовании горячего воздуха в системе. Данное решение позволяет использовать при измельчении термочувствительные и клейкие материалы. К недостаткам данного типа оборудования можно отнести достаточно невысокую производительность, и недостаточно эффективное измельчение некоторых материалов [34-36].

Необходимо отметить мельницы с деформируемыми рабочими органами, которые считаются отдельным классом оборудования. К ним относятся мельницы с поперечно деформируемой рабочей камерой, мельницы с пружинными рабочими органами и волновые мельницы. В результате раздавливающе-стирающего воздействия могут образовываться частицы размером менее 5 мкм [34-38].

Несмотря на высокую тонкость помола, данному классу оборудования присущи следующие недостатки, такие как: высокие затраты энергии, сильный

износ рабочих органов, вследствие необходимости развития высокой частоты помольной камеры (до 3000 об/мин) и загрязнение готового продукта. [39,40]

В настоящее время получают все большее распространение аппараты вихревого слоя ферромагнитных процессов (рисунок 1.11), предназначенные для интенсификации различных физических и химических процессов [1].



Рисунок 1.11 - Фотография аппарата вихревого слоя ферромагнитных частиц АВЭП (АВС)

Эти аппараты характеризуются герметичностью и отсутствием динамических уплотнителей и состоят из электромагнитного устройства с системой охлаждения, рабочей камеры и пульта управления.

Аппараты вихревого слоя (рисунок 1.12) надежны в работе, могут устанавливаться в производственных помещениях без специальных фундаментов. Интенсификация процессов в АВЭА (АВС) происходит за счет интенсивного перемешивания и диспергирования компонентов, обрабатываемых акустической, электромагнитной обработкой, а также высоким локальным давлением и электролизом.

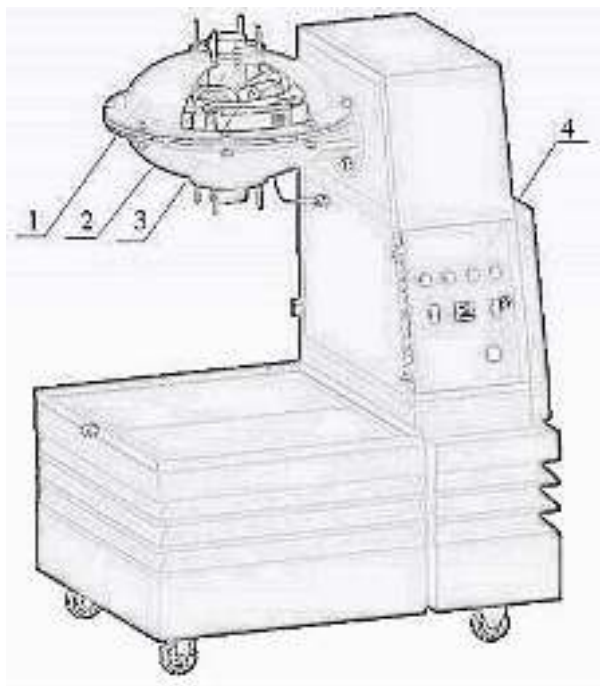


Рисунок 1.12 - Общая схема аппарата АВЭП (ABC)-100

1 – корпус индуктора; 2 – индуктор ЭМП; 3 – рабочая камера; 4 – пульт управления

Устройства данного типа могут использоваться в различных отраслях: машиностроительной, химической, пищевой, строительной, горнодобывающей, химической, а также применяться для производства многокомпонентных суспензий и эмульсий, ускорения процессов получения тонкодисперсных смесей, активации веществ, как в сухом состоянии, так и в виде водных дисперсий [1].

В основе работы устройства (рисунок 1.13) лежит принцип превращения энергии электромагнитного поля в другие виды энергии. Устройство представляет собой рабочую камеру (трубопровод) диаметром 90-136 мм, которая размещена в индукторе вращающегося электромагнитного поля. В рабочей зоне трубопровода размещены металлические ферромагнитные элементы диаметром 0,5-5 мм и длиной 5-60 мм в количестве от нескольких десятков до нескольких сотен штук (массой загрузки 0,05-5 кг) в зависимости от объема рабочей зоны аппарата [1].

Под действием вращающегося электромагнитного поля ферромагнитные элементы двигаются в рабочей зоне и создают так называемый «вихревой слой» [1].

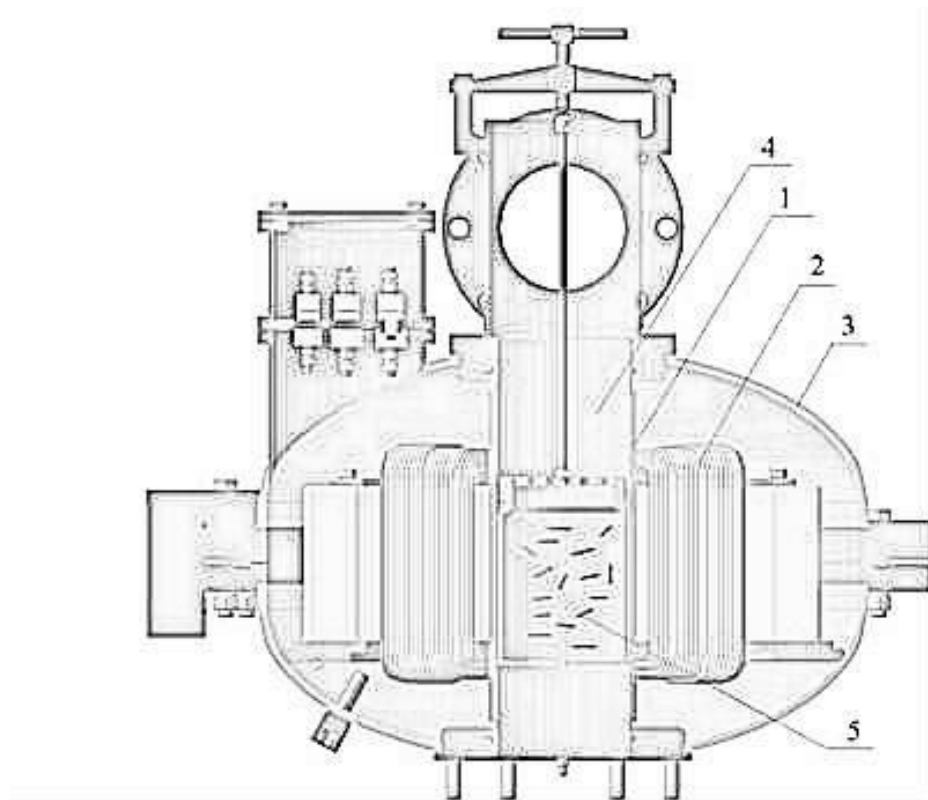


Рисунок 1.13 - Схема электромагнитного аппарата с вихревым слоем
 1 – защитная втулка; 2 – индуктор вращающегося электромагнитного поля;
 3 – корпус индуктора; 4 – рабочая камера из немагнитного материала;
 5 – ферромагнитные элементы

К преимуществам данного вида оборудования можно отнести высокую тонкость помола, перемешивание и активация обрабатываемых веществ, невысокое потребление электроэнергии, легкость внедрения в существующие технологические линии. Однако небольшие размеры помольной камеры достаточно сильно ограничивают производительность устройств данного типа.

На основании вышеперечисленного помольного оборудования для тонкого и сверхтонкого измельчения можно сделать вывод что все виды измельчителей помимо индивидуальных недостатков (высокие затраты энергии, износ рабочих органов, сложность конструкции и др.) в значительной мере загрязняют тонкодисперсный продукт частицами износа. При использовании мельниц струйной энергии с принципом самоизмельчения этот недостаток можно свести к минимуму.

1.4. Струйные мельницы

Первые пневмоструйные установки берут свое начало со второй половины 19 века, когда появляются первые официальные данные о запатентованных установках. Широкое развитие мельниц струйного измельчения произошло в США с середины 40-х годов прошлого века, а в России они появились с начала 50-х годов [41-43].

Струйный помол рассматривался разработчиками как альтернатива шаровому измельчению, с возможностью получения более высокодисперсного продукта при относительно равных энергетических затратах. Также струйное измельчение имеет ряд преимуществ, таких как:

- высокая скорость воздействия при измельчении материала, и, как следствие, высокая дисперсность продукта (от 50 до менее 1 мкм);
- несложная интеграция мельницы в замкнутый цикл с сепарирующим оборудованием;
- пониженное загрязнение конечного продукта вследствие отсутствия вращающихся частей в зоне помола;
- отсутствие мелющих тел в зоне помола;
- возможность сочетания помола и разделения с другими различными технологическими процессами;
- небольшой уровень шума при работе;
- минимальное выделение пыли в окружающую среду в силу использования замкнутого цикла.

Вследствие вышеперечисленных преимуществ, струйный помол является весьма перспективной темой для исследований и широко востребован практически во всем мире [44-48].

Помимо производства крупных промышленных установок множество фирм занимаются разработками компактных пневмоструйных мельниц с сепараторами, заключенными в единый корпус. Одним из таких примеров может являться струйная противоточная мельница американской фирмы Jet Pulverizer Company,

представленная на рисунок 1.14 [49].

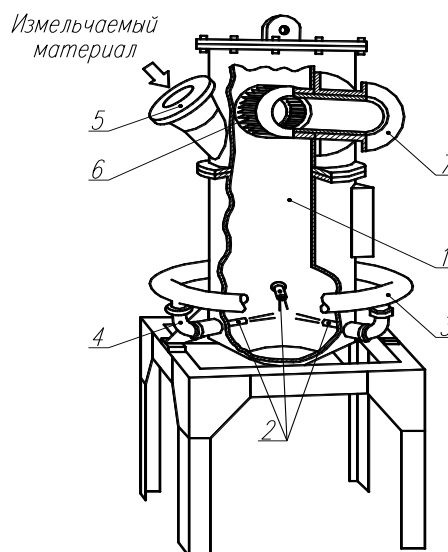


Рисунок 1.14 - Пневмоструйная мельница, совмещенная с сепаратором

1 – помольная камера; 2 – реактивные сопла; 3 – коллектор; 4 – патрубки;
5 – загрузочная воронка; 6 – классификатор; 7 – трубопровод

Данная мельница работает следующим образом. Исходный материал поступает в помольную камеру 1 через загрузочную воронку 5. Энергоноситель подается в три реактивных сопла 2 через коллектор 3.

Процесс измельчения происходит при соударениях трех потоков струй, истекающих из реактивных сопел, установленных под углом 120° . Далее поток поступает в классификатор 6, где при вращении ротора мелкие частицы сразу уносятся в циклон по трубопроводу 7, а крупные частицы отбрасываются центробежной силой к периферии и осаждаются в помольную камеру на домол под действием собственной силы тяжести [49].

Данная мельница применяется для тонкодисперсного помола различных материалов. Установка работает при давлении сжатого воздуха до 1,5 МПа, и частоте вращения ротора классификатора 2000 об/мин, при этом максимальный размер конечного продукта не превышает 30 мкм.

К преимуществам данной установки можно отнести простоту и надежность, однако небольшая кратность циркуляции, малая производительность и повышенный износ футеровки в зоне помола может говорить о несовершенстве ее конструкции.

Для получения порошка микроцемента может использоваться конструкция измельчителя, предложенная в патенте [50] (рисунок 1.15, а).

Шнековый питатель 7 подает сырьевой материал в камеру измельчения. Через сопла 6 высокоскоростные струи воздуха, проходя через разгонные трубки 5, подхватывают частицы материала. Выпускной патрубок 1 служит для удаления частиц готового материала, в то время как более крупные и тяжелые частицы опускаются в низ помольной камеры 4 на домол. В целях увеличения эффективности измельчения, в конструкции предусмотрено применение отражателя 3, играющего роль ударной плиты, в верхней части камеры с выпускным патрубком 2. Также в целях повышения эффективности измельчения в центральной части помольной камеры может быть установлен отбойник 8 (рисунок 1.15, б).

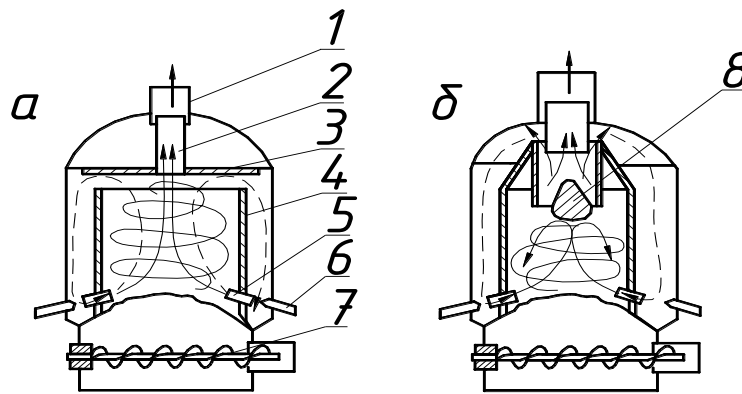


Рисунок 1.15 - Измельчитель с цилиндрической камерой: а) с отражателем в верхней части камеры; б) с отбойником в центральной части

1, 2 – выпускные патрубки; 3 – отражатель; 4 – помольная камера; 5 – разгонные трубки; 6 – сопла; 7 – шнековый питатель; 8 – отбойник

Описанные мельницы, несмотря на простоту и надежность, имеют существенный недостаток – необходимость футеровки помольной камеры. А так как установки могут достигать больших промышленных размеров, потребуются значительные затраты на изготовление футеровочных материалов и на проведение футеровочных работ.

В качестве струйного измельчителя, характеризующегося несущественным износом камеры помола и внутренних элементов, можно представить установку, разработанную в США [51] (рисунок 1.16).

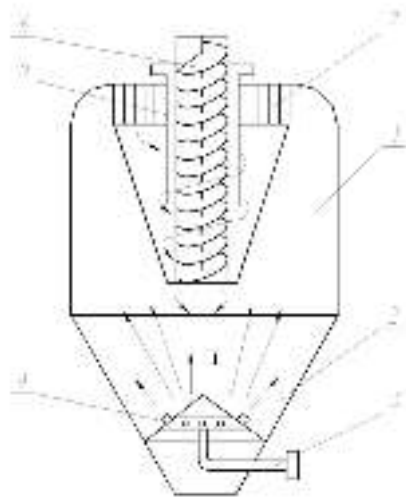


Рисунок 1.16 - Струйный измельчитель для обработки порошкообразных материалов
 1 – цилиндрическая верхняя часть; 2 – коническое днище; 3 – коллектор; 4 – сопла;
 5 – центральная труба; 6 – винтовой питатель; 7 – классификатор

Корпус измельчителя состоит из цилиндрической верхней части 1 и конического днища 2. Газообразный носитель, проходя через коллектор 3 и сопла 4, расположенные равномерно по окружности, поступает в нижнюю часть корпуса. Газ на выходе из отверстий сопел может достигать звуковой, а также и сверхзвуковой скорости. Через центральную трубу 5 с использованием винтового питателя 6 исходный материал поступает в корпус. Частицы исходного порошка подхватываются высокоскоростным потоком и выносятся в верхнюю часть корпуса к установленному классификатору 7. Измельчение осуществляется за счет соударения частиц в завихрениях двухфазного потока при перемешивании высокоскоростного и низкоскоростного потоков.

Интенсивно перемешиваясь, поток со взвешенными частицами приобретает невысокую скорость и проходит через лопатки классификатора. За счет центробежных сил крупная фракция обрабатываемого материала отделяется от мелкой. Изменяя угол наклона лопаток, можно регулировать границу разделения фракций. Тонкая фракция выносятся из измельчителя по кольцевому зазору

между питателем и наружной трубкой. Крупная возвращается на домол в нижнюю часть корпуса.

Анализируя конструкцию данного измельчителя можно констатировать, что для достижения высокой тонкости помола потребуется значительный расход энергоносителя.

Исследователи БГТУ им. В.Г. Шухова также занимаются разработками мельниц струйного помола, в том числе мельниц с возможностью самофутеровки помольной камеры, которые при испытаниях показали хорошие результаты [52].

В качестве примера рассмотрим предложенную и запатентованную пневмоструйную мельницу для получения цементов с регулируемыми свойствами. Схема установки представлена на рисунке 1.17 [53].

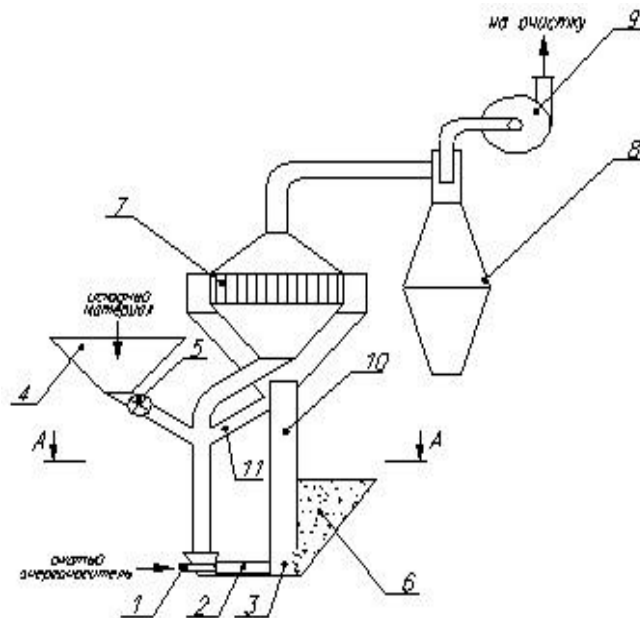


Рисунок 1.17 - Принципиальная схема установки струйного измельчения с самофутерующей отбойной плитой

- 1 – сопло; 2 – разгонное устройство; 3 – камера помола; 4 – загрузочный бункер;
 5 – питатель; 6 – емкость с футеровочным материалом; 7 – классификатор;
 8 – пылесадительное устройство; 9 – вентилятор; 10 – патрубок пылеуноса;
 11 – течка возврата

Установка работает следующим образом. Ёмкость 6 наполняется футеровочным или измельчаемым материалом. При помощи питателя 5 измельчаемый материал из загрузочного бункера 4 попадает в три разгонных

устройства 2. Далее исходный материал сжатым воздухом или газом подхватывается из источника энергоносителя 1, попадая в разгонное устройство 2, разгоняясь, сталкивается с материалом, поступающим из ёмкости 6 под собственным весом. Далее действием разряжения, создаваемым вентилятором 9, измельченный материал поднимается в классификатор 7 по патрубке пылеуноса 10, где готовый продукт попадает в пылеосадительное устройство 8, а недоизмельченный материал по течеке возврата 11 под собственным весом поступает на повторное измельчение [54].

Конструкция данной мельницы, реализующей механизм самофутеровки рабочей камеры, позволяет исключить работы по замене отбойной плиты и как следствие исключить простои мельницы. Однако необходимо следить за количеством футеровочного материала и при необходимости добавлять его в ёмкость 6 по мере расходования.

К другим разработкам БГТУ им. В.Г. Шухова можно отнести пневмоструйную установку для доизмельчения цемента представленную на рисунке 1.18 [55].

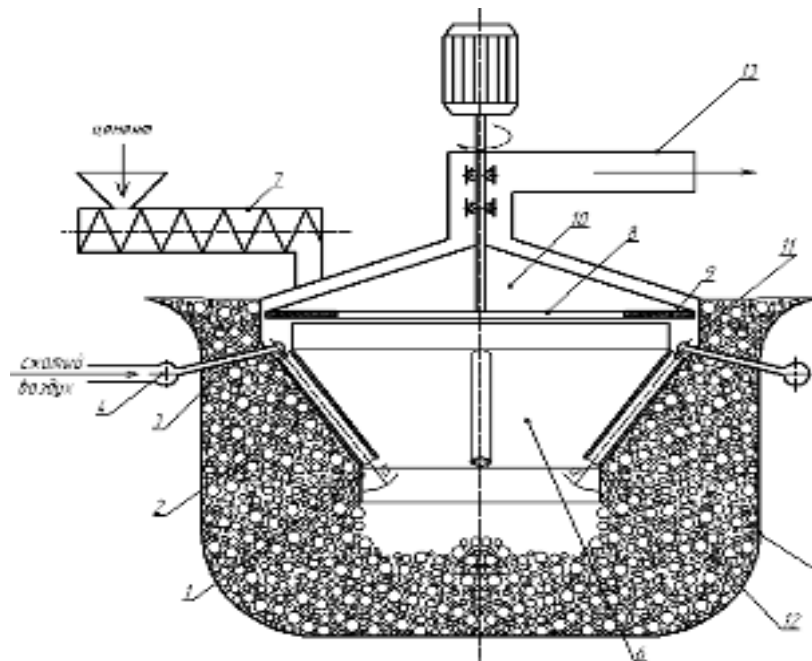


Рисунок 1.18 - Схема установки для пневмоструйного доизмельчения цемента

1 – внутренний корпус; 2 – разгонные трубки; 3 – сопла; 4 – коллектор; 5 – внешний корпус; 6 – помольная камера; 7 – шнековый дозатор; 8 – ротор-классификатор; 9 – разбрасывающая тарель; 10 – отбойные лопатки; 11 – отбойная футеровка; 12 – клинкер; 13 – патрубок отвода готового продукта

«Установка работает следующим образом. Энергоноситель, например, сжатый воздух, подается в коллектор 4 и через сопла 3 передается в разгонные трубки 2. Измельчаемый материал шнековым дозатором 7 сбрасывается на разбрасывающую тарель 9. Далее под действием центробежной силы материал равномерно распределяется на цилиндрической отбойной футеровке 11, и подсасывается в зону действия струй, истекающих из сопел 3, разгоняется в разгонных трубках 2 и сталкивается со слоем цементного клинкера 12 в нижней части помольной камеры 6. Измельчение в том числе происходит за счет соударения частиц цемента по касательной в центральной части помольной камеры 6, что задается углом α . Далее измельченный материал поступает в ротор-классификатор, где грубая фракция возвращается на домол, а готовый продукт, достигший необходимой степени измельчения удаляется через патрубок 13 на осаждение и пылеочистку» [55].

Данная установка на полупромышленных испытаниях показала высокую тонкость помола, и достаточно высокую надежность работы.

К новейшим разработкам в области струйного измельчения можно отнести мельницу CONDUX немецкой фирмы NETZSCH [56] (рисунок 1.19).

Данные мельницы способны обеспечивать измельчение материалов в диапазоне от $d_{97}=2$ мкм до $d_{97}=70$ мкм при этом позволяют измельчать продукты



Рисунок 1.19 - Фотография струйной мельницы NETZSCH-CONDUX с псевдооживленным слоем, модель CGS

независимо от твердости, не загрязняют материал, а также позволяют работать с холодными (0-20 °С) и горячими (до 250 °С), а также инертными газами. Мельница работает следующим образом (рисунок 1.20).

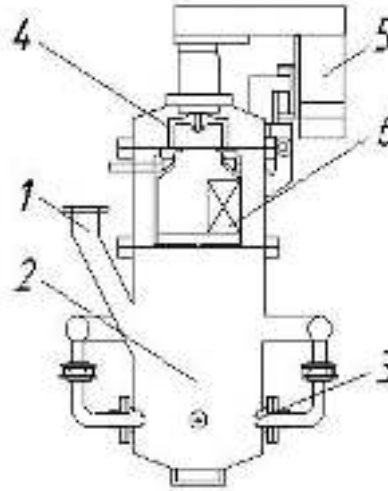


Рисунок 1.20 - Принципиальная схема работы струйной мельницы NETZSCH-CONDUX с псевдоожиженным слоем, модель CGS

1 – патрубок подачи; 2 – камера измельчения; 3 – сопла; 4 – классифицирующий ротор;
5 – электродвигатель; 6 – помольная камера

Измельчаемый продукт подается через шлюзовую питатель в патрубок 1, расположенный выше уровня сопел. Псевдоожиженный слой материала формируется в основании камеры измельчения 2 под действием газовых потоков, поступающих из измельчающих сопел 3. Частицы из слоя вовлекаются в поток, ускоряясь им в направлении центра камеры. Измельчение происходит за счет соударения частиц в газовом потоке, а также в центре камеры. Разряженный измельчающий газ вместе с частицами поднимается вверх к классифицирующему ротору 4, который приводится в движение клиноременной передачей и электродвигателем 5, управляемым частотным преобразователем. Крупные частицы отлетают от классифицирующего ротора и возвращаются в псевдоожиженный слой. Тонкие частицы вместе с потоком измельчающего газа покидают мельницу через выход тонкого продукта 6. Далее продукт отделяют от газа в циклоне и фильтре [56].

Большое количество типоразмеров этих установок позволяет использовать их как для исследовательских задач и производства малых количеств материалов, так

и производить большие количества товарных микропорошков различного назначения.

Несмотря на большое разнообразие существующих конструкций струйных измельчителей, а также плодотворную патентную работу в России и за рубежом [57-79], большинство исследователей отдают предпочтение эжекторным струйным мельницам [80-85].

1.5. Основные теоретические положения расчета параметров эжекторных струйных мельниц

В установках струйной энергии эффективность измельчения зависит от физико-механических и гидромеханических условий. Гидромеханические в большей степени зависят от конструктивных параметров установки. Поэтому при проектировании струйных установок важное значение имеют конструктивные и режимные параметры мельницы, а также пылеулавливающих устройств.

Таким образом, необходимо провести анализ уже существующих методик, прежде чем выдвигать теоретические предпосылки предполагаемых к разработке методик расчета.

В настоящее время при помощи газодинамики, и, в частности, теории турбулентных струй, достаточно хорошо исследованы однофазные и двухфазные газовые струи [86-89]. Ранее, при решении схожего рода задач, использовались приближенные методы решения. Так, Акунов В.И., один из создателей струйной помольной техники, разработал теорию струйных мельниц, на базе теоретических основ гидродинамики. Полученные представления позволили установить основные количественные зависимости параметров свободных и стесненных струй, а также эжекторов. В теории Акунова истекающая газовая струя с твердой фазой разбита на четыре участка различной структуры, а также с различной формой поверхностей раздела [42]. Данное представление процесса струеобразования отличается от метода предложенного Голеевским А.А. [90], в котором участки струи характеризуются величиной коэффициента увлечения, и

обладает некоторыми преимуществами.

С помощью предложенной Акуновым В.И. теорией были получены критический весовой расход твердой фазы, предельное и оптимальное значение её концентрации в зависимости от скорости газа и плотности частиц, критический расход газовой фазы [41-43, 91]. В целом эта методика расчета эжекторов дает результаты, достаточно хорошо приближающиеся к экспериментальным, в силу того, что как раз результаты экспериментальных исследований и служили отправными данными. Предполагается, что исходными данными являются производительность мельницы и параметры энергоносителя.

Расход энергоносителя рассчитывается по выражениям:

$$\text{- объемный} \quad Q_v = 1,88 P_m, \text{ (м}^3\text{/ч)}; \quad (1.1)$$

$$\text{- весовой} \quad G_g = 1,45 P_m, \text{ (м}^3\text{/ч)} \quad (1.2)$$

где P_m – задаваемая производительность мельницы.

Установлены следующие параметры и размеры:

1) расход материала в разгонных трубках K_{mp} , кг/ч·мм²

$$K_{mp} = \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot d_{mp}^2}, \quad (1.3)$$

где Q – фактическая производительность мельницы, кг/ч;

d_{mp} – диаметр разгонной трубки, мм;

2) концентрация материала в помольном объеме K_n , кг/ч·мм³

$$K_n = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \ell_{стр} \cdot d_{mp}^2}, \quad (1.4)$$

где $\ell_{стр}$ – расстояние между срезами разгонных трубок, мм;

3) диаметр разгонной трубки из выражения (1.3) d_{mp} , мм

$$d_{mp} = \sqrt{\frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot K_{mp}}}, \quad (1.5)$$

если принять $K_{mp} = 0,234$ кг/ч·мм², тогда выражение (1.5) примет вид

$$d_{mp} = 1,62 \cdot \sqrt{Q}; \quad (1.6)$$

4) диаметр сопла, подводящего энергоноситель d_c , мм

$$d_c = 0,435 \cdot \sqrt{Q}; \quad (1.7)$$

5) длина разгонной трубки L_{mp} , мм

$$L_{mp} = 122 + 2,36(d_{mp} - d_c); \quad (1.8)$$

6) диаметр помольной камеры d_k , мм

$$d_k = 3 \cdot d_{mp}; \quad (1.9)$$

7) длина помольной камеры L_k , мм

$$L_k = 2,5 \cdot d_k; \quad (1.10)$$

8) диаметр трубки подсоса газа D_n , мм

$$D_n = d_k. \quad (1.11)$$

9) критическая скорость истечения энергоносителя:

$$W_{кр} = 3,52 \sqrt{P_1 v_1} \quad (1.12)$$

Кроме расчета геометрических параметров элементов струйной установки необходимо определять аэродинамические характеристики мельницы. К последним относятся скорости двухфазного потока и давление в каждой точке системы. Такой аэродинамический расчет для инжекторного узла можно произвести с помощью расчетных формул, основанных на коэффициенте рассеяния энергии в струе [91].

Полуугол разлета струи:

$$\arctg \alpha' = K \left(1 \pm \psi \frac{v_2}{v_1} \right) \operatorname{tg} \alpha \quad (1.13)$$

- при истечении струи из цилиндрической трубы в неподвижную жидкость, $K=0,9$; $v_2 = 0$; $\operatorname{tg} \alpha = 0,222$; $\operatorname{tg} \alpha' = 0,2$; $\alpha' = 11^\circ 20'$ угол разлета струи

$$\theta = 2\alpha' = 22^\circ 40'$$

- при истечении осесимметричной струи из сопла с косым срезом в неподвижную жидкость; $K=0,8$; $\operatorname{tg} \alpha' = 0,178$; $\alpha' = 10^\circ$ $\theta = 20^\circ$

- при истечении осесимметричной струи из сопла с косым срезом в движущуюся жидкость $K=0,9$; $\psi = 0,5$ $v_2 = 0,3v_1$; $\operatorname{tg} \alpha' = 0,23$; $\alpha' = 13^\circ$ $\theta = 26^\circ$ [95].

Длина начального участка (потенциального ядра) струи согласно [41,42]:

$$l_c = \frac{d_1}{2tg\alpha'}; \quad (1.14)$$

где d_1 - диаметр сопла;

Диаметр струи на начальном участке, м

$$d_{3_{нач}} = d_1 \left(\frac{1 + \varphi_{нач}}{1 - \varphi_{нач}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.15)$$

Скорость струи на начальном участке, м/с

$$v_{3_{нач}} = \frac{v_1}{1 + 3\varphi_{нач}}, \quad (1.16)$$

Средняя скорость на основном участке струи, м/с

$$v_{3_{осн}} = v_1(1 - \varphi_{осн}) \quad (1.18)$$

Скорость на начальном и основном участках струи, м/с

$$v_3 = v_1 \left[1 - \varphi_{осн} \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad (1.19)$$

Диаметр струи на основном участке, м

$$d_{3_{осн}} = \frac{d_1}{1 - \varphi_{осн}} \quad (1.20)$$

Средняя скорость увлечения, м/с

$$v_2 = \frac{v_1}{2} (1 - \varphi) tg\alpha' \quad (1.21)$$

Время пребывания частицы в струе, с

$$\Delta\tau_m = \frac{2d_1}{v_1(1 - \varphi)^2 tg\alpha'} \quad (1.22)$$

Таким образом показано, что методика расчета конструктивных параметров противоточной струйной мельницы (выражения 1.1-1.12) основывается на экспериментальных данных и носит эмпирический характер. Также необходимо заметить, что размеры помольной камеры являются функциями диаметра разгонных трубок [41,42].

В нашем случае, предполагается, что процесс измельчения протекает в замкнутом стесненном объеме при взаимодействии высокоскоростных потоков

аэровзвеси, что требует уточнения методики расчета некоторых параметров мельницы.

1.6. Предлагаемое конструктивно-технологическое решение установки для помола микроцемента

Проанализировав вышеприведенные конструкции установок струйной энергии, можно сделать вывод о необходимости дальнейших разработок конструкций мельниц, с улучшенными технологическими и техническими параметрами.

Также следует заметить, что в последнее время приобретают всю большую популярность компактные малотоннажные технологические комплексы. Для таких целей гораздо более целесообразно применять малогабаритные, низкочастотные и относительно дешевые измельчительные установки струйного доизмельчения.

В данной работе рассматривается пневмоструйная мельница, в которой процесс доизмельчения микроцемента осуществляется за счет направленного столкновения восьми скоростных потоков с измельчаемым материалом друг с другом в замкнутом стесненном объеме, что обеспечивает повышение эффективности процесса измельчения и увеличивает качество получаемого продукта по дисперсности. Конструкция мельницы защищена патентом РФ на полезную модель №174065 «Струйная мельница тонкого помола» [93].

Её предлагается использовать для тонкого и сверхтонкого помола тампонажного цемента с целью производства микроцемента (рисунок 1.21).

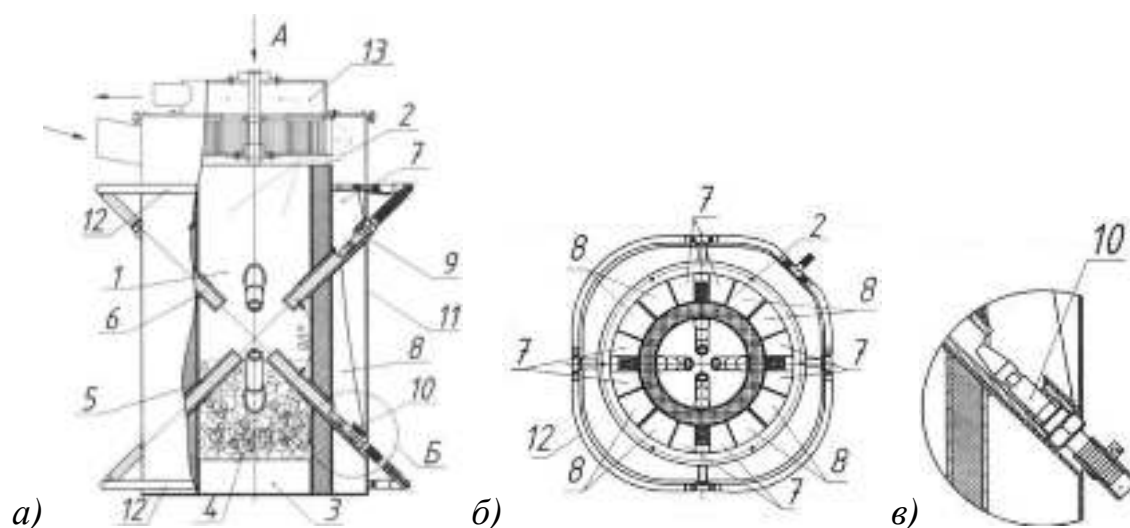


Рисунок 1.21 - Пневмоструйная мельница: а) вид сбоку; б) вид сверху; в) вид Б на виде сбоку
 1 – камера помола; 2 – внутренний корпус; 3 – днище; 4 – крупнокусковой измельчаемый материал; 5 – нижние разгонные трубки; 6 – верхние разгонные трубки;
 7, 8 – каналы; 9 – верхний пояс эжекторных узлов; 10 – 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° между собой, установлены под углом 45° 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° .

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 струйной мельницы позволяет эффективно измельчать материал, что способствует снижению энергозатрат при получении тонкодисперсных порошков. Данная компоновка технологического комплекса имеет относительно небольшую металлоёмкость, не требует больших производственных площадей, а также позволяет совместить помол с воздушной сепарацией, сушкой, а при необходимости, и перемешивание нескольких измельчаемых компонентов [93].

1.7. Цель и задачи исследований

Целью настоящей работы является разработка конструкции и теоретических основ расчёта технологических и конструктивных параметров пневмоструйной мельницы для получения микроцемента.

В соответствии с поставленной целью в работе необходимо решить *следующие задачи*:

1. Провести анализ различных конструкций современных установок для тонкого и сверхтонкого измельчения, выявить их достоинства, недостатки и основные направления их совершенствования.

2. Разработать математические выражения, устанавливающие взаимосвязь между конструктивными и технологическими параметрами помольной камеры пневмоструйной мельницы предложенной конструкции.

3. Аналитически согласовать пропускную способность разгонного узла и загрузочного устройства мельницы.

4. Провести исследования пневмоструйной мельницы в лабораторных условиях.

5. 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.

6. Осуществить промышленное внедрение пневмоструйной мельницы для получения микроцемента.

1.8. Выводы

1. Рассмотрено современное состояние и основные направления развития и совершенствования техники для тонкого и сверхтонкого измельчения материалов. Выявлено, что несмотря на многообразие различных типов установок для помола, струйные мельницы являются одними из перспективных видов оборудования.

2. Установлены предпочтительные качества пневмоструйных установок для тонкого и сверхтонкого помола: простота конструкции и эксплуатации; небольшая металлоемкость, малая занимаемая производственная площадь; возможность совмещения в одном аппарате нескольких процессов.

3. Предложена новая конструкция пневмоструйной мельницы,

предназначенной для получения микроцемента.

4. Поставлены цель и задачи исследований.

2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМОСТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

В предлагаемом помольном устройстве (см. рисунок из первой главы описание патента) предполагается использовать 8 разгонных узлов, направленных друг против друга и установленных под углом 45^0 относительно горизонтальной оси. Такое конструктивное исполнение выдвигает ряд новых задач по уточнению методик расчета конструктивно-технологических параметров основного узла мельницы – помольного блока. Также следует рассмотреть основные условия возникновения и протекание процессов в этом узле, их взаимосвязь с процессом подачи материала на измельчение из питающего устройства, установить их характеристики и предложить описание закономерностей для некоторых наиболее значимых параметров.

2.1. Вычисление пропускной способности разгонной трубки эжекторного узла

Исходя из сказанного выше, 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.

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

$$W_T = \frac{dV_m}{dt}, \quad (2.1)$$

где V_m – объем цемента в разгонной трубке, м^3 ;

t – текущее значение времени, с.

Объем твердой фазы (цемента) в разгонной трубке найдем согласно расчетной схеме, представленной на рисунке 2.1.

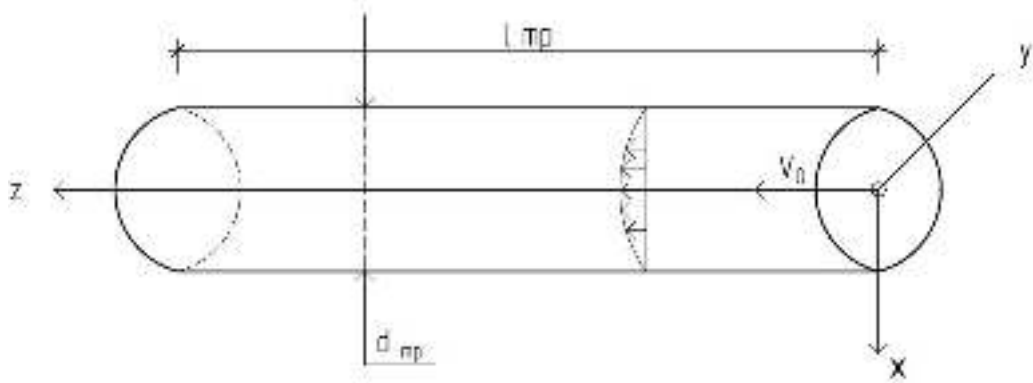


Рисунок 2.1 - Расчетная схема для определения объемной пропускной способности разгонной трубки

Объем материала, перемещающегося в разгонной трубке, запишем выражением:

$$V_m = \iiint_V dV. \quad (2.2)$$

В силу аксиальной симметрии цилиндрической разгонной трубки диаметром d_{mp} вычисление интеграла (2.2) необходимо выполнить в цилиндрической системе координат (r, φ, z) , представленной на рисунке 2.1.

В цилиндрической системе координат элемент объема равен:

$$dV = r dr d\varphi dz. \quad (2.3)$$

С учетом (2.2) и (2.3) соотношение (2.1) можно привести к следующему виду:

$$W_T = \frac{d}{dt} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{l_{mp}} dz \int_0^{d_{mp}/2} r dr. \quad (2.4)$$

После математических преобразований формула (2.4) примет вид:

$$W_T = 2\pi l_{mp} \int_0^{d_{mp}/2} \frac{dr}{dt} dr. \quad (2.5)$$

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

$$w_r = \frac{dr}{dt}. \quad (2.6)$$

Изменение значений этой скорости, удовлетворяющее естественному граничному условию:

$$w_r(r = d_{mp} / 2) = 0 \quad (2.7)$$

представим в следующем виде:

$$w_r = v_0 \left[1 - \left(\frac{r}{d_{mp} / 2} \right)^2 \right], \quad (2.8)$$

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

$$v_0 = \varphi_0 \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{\rho}}, \quad (2.9)$$

$$\rho = \frac{RT}{P}, \quad (2.10)$$

где P - давление в сопле, МПа;

P_0 - давление в камере, МПа;

ρ - плотность воздуха в сопле $\rho = \rho(P)$, кг/м³;

T - температура по шкале Кельвина, К;

R - универсальная газовая постоянная, равная для воздуха 287,14 Дж/(кг/К);

φ_0 - коэффициент скорости, значение которого, согласно [94] можно принять равным 0,668.

С учетом (2.6) и (2.8) формула (2.5) принимает вид:

$$W_T = 2\pi l_{mp} v_0 \int_0^{d_{mp}/2} \left[1 - \left(\frac{2r}{d_{mp}} \right)^2 \right] dr. \quad (2.11)$$

Вычисление интеграла в (2.11) приводит к следующему результату:

$$W_T = \frac{2}{3} \pi l_{mp} d_{mp} v_0. \quad (2.12)$$

Подстановка (2.9) с учетом (2.10) в (2.12) позволяет получить окончательно соотношение:

$$W_T = \frac{2}{3} \pi \varphi_0 l_{mp} d_{mp} \sqrt{\frac{2(P - P_0)RT}{P}}. \quad (2.13)$$

Таким образом, полученное выражение (2.13) определяет максимальную объемную пропускную способность разгонной трубки [95] непосредственно для условий работы мельницы в установленных в начальных условиях задачи.

2.2. Определение условий установившегося режима работы пневмоструйной мельницы

Установка для получения высокодисперсных порошков представляет собой совокупность нескольких технологических устройств, а именно: устройства для подачи измельчаемого материала - вибропитателя 1, блока помола 2, сепаратора 3, циклона 4, рукавного фильтра 5 и вытяжного вентилятора 6 (рисунок 2.2).

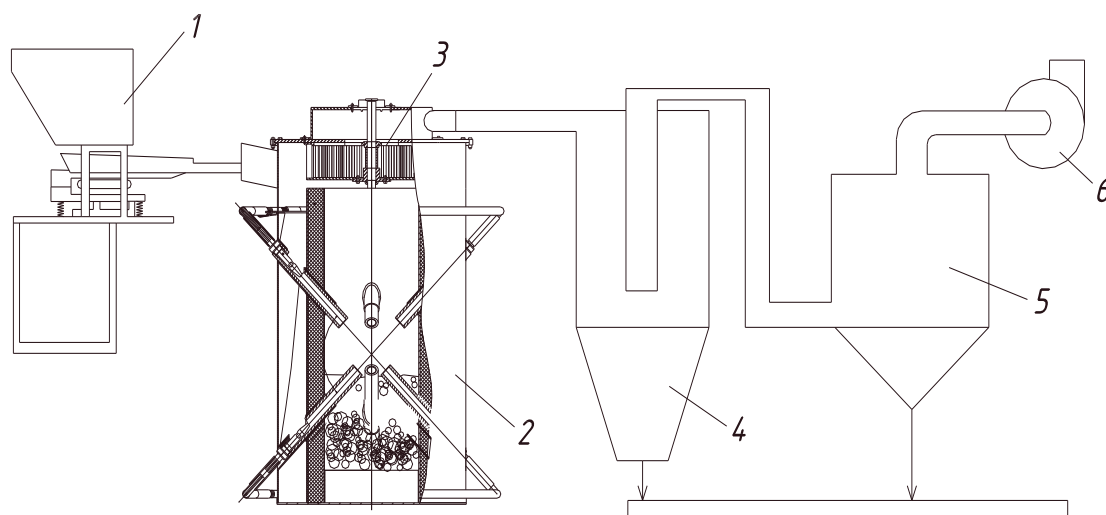


Рисунок 2.2 - Установка для пневмоструйного получения высокодисперсных порошков.

1 – вибропитатель; 2 – блок помола; 3 – сепаратор; 4 – циклон; 5 – рукавный фильтр;
6 – вытяжной вентилятор

Основным узлом в этой совокупности является сама мельница, в свою очередь, состоящая из блока помола 2 и сепаратора 3. Очень важным моментом в её работоспособности является соблюдение условий устойчиво установившегося режима работы.

Поскольку насыщенность аэрозвеси твердыми частицами существенно влияет на эффективность помола при столкновении сталкивающихся потоков в

помольной камере [81], можно предположить, что важной технологической задачей является определение рационального количества материала, подаваемого вибропитателем на измельчение, к количеству воздуха, эжектируемого в разгонные узлы установки. То есть, фактически необходимо иметь согласованные пропускную способность вибрирующего лотка и пропускную способность эжекторных узлов блока помола мельницы, что позволит гарантировать установившийся режим её работы.

Для аналитического описания допущенного предположения рассмотрим движение порции цемента, поступающего на вибрирующий лоток вибропитателя шириной l и высотой Δ . Плоскость лотка совершает гармонические колебания с частотой ω и амплитудой A . Возбуждающие колебания образуют угол α с горизонтом лотка (рисунок 2.3).

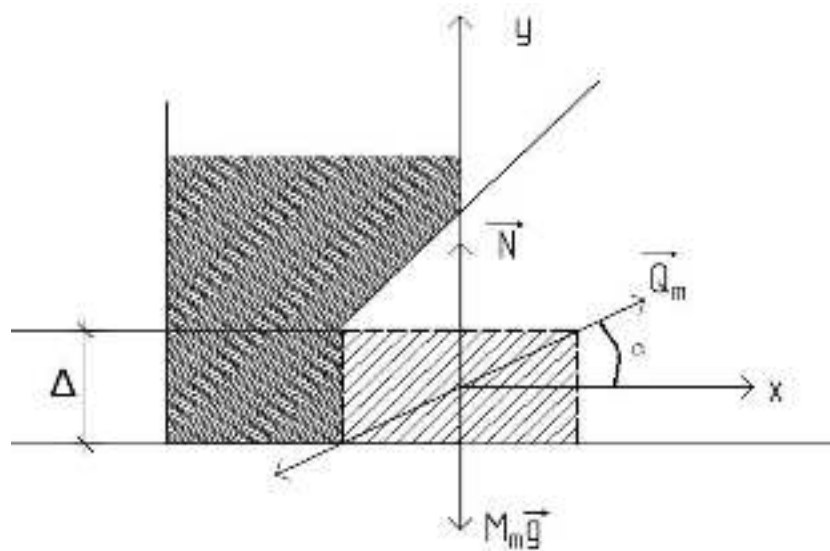


Рисунок 2.3 - Расчетная схема для определения скорости виброперемещения порции цемента вдоль поверхности загрузочного лотка

Согласно расчетной схеме, представленной на рисунке 2.3, на выделенный элемент цемента, поступающего из загрузочного бункера, будут действовать следующие силы:

$$\vec{P} = M_m \cdot \vec{g}, \quad (2.14)$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_{mp} &= fN, \text{ если } \dot{x} > 0 \\ \vec{F}_{mp} &= -fN, \text{ если } \dot{x} < 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.15)$$

$$\vec{Q}_m = M_m A \omega^2 \sin \omega t \cdot \vec{e}, \quad (2.16)$$

где \vec{P} - вес выделенной порции цемента, кг;

N - величина силы нормального давления, МПа;

f - коэффициент трения;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

\vec{e} - единичный вектор в направлении действия вибрации;

M_m - масса выделенной порции цемента, кг.

Для аналитического описания движения слоя цемента вдоль поверхности вибрирующего лотка сделаем следующие допущения. Движение слоя будем рассматривать как движение неупругой частицы массой M_m . В момент отрыва t_0 слоя от поверхности лотка последний будет иметь вектор скорости равный вектору скорости вибрационного лотка $A\omega \cdot \cos \omega t \cdot \vec{e}$. Влияние толщины слоя « Δ » будем учитывать силой сопротивления \vec{F}_c , значение которой пропорционально скорости движения слоя вне плоскости. Соприкосновение слоя цемента с вибрирующей плоскостью лотка осуществляется в рамках неупругого взаимодействия, в результате которого слой цемента мгновенно приобретает скорость колеблющегося лотка.

На основании сделанных предположений и расчетной схемы (рисунок 2.3) уравнение движения слоя цемента в векторной форме будет иметь вид:

$$M_m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{P} + \vec{N} + \vec{F}_{mp} + \vec{Q}_m + \vec{F}_c, \quad (2.17)$$

где \vec{r} - радиус вектор смещения центра тяжести выделенного слоя цемента.

Введем двумерную декартовую систему координат с началом в центре тяжести выделенного слоя (рисунок 2.3).

Проекция уравнения (2.17) на ось « OX » дает:

$$M_m \frac{d^2 x}{dt^2} = A \omega^2 M_m \sin \omega t \cos \alpha \mp fN - KA \omega \cos \omega t \cos \alpha, \quad (2.18)$$

где K – коэффициент пропорциональности, (с⁻¹ кг).

Проекция уравнения (2.17) на ось « oy » дает:

$$M_m \frac{d^2 y}{dt^2} = N - M_m g + M_m \omega^2 A \sin \omega t \cdot \sin \alpha - K A \omega \cos \omega t \sin \alpha. \quad (2.19)$$

Рассмотрим случай безотрывного движения ($y=0$) движения слоя цемента вдоль вибрационной плоскости лотка. Уравнение (2.19) в данном случае преобразуется в выражение вида:

$$N - M_m g + M_m \omega^2 A \sin \omega t \sin \alpha = 0, \quad (2.20)$$

На основании (2.20) можно получить условие отрыва слоя цемента от колеблющейся плоскости лотка ($N=0$):

$$\frac{A \omega^2 \cdot \sin \omega t \sin \alpha}{g} = 1, \quad (2.21)$$

В силу того, что:

$$|\sin \omega t| \leq 1, \quad (2.22)$$

соотношение (2.21) с учетом (2.22) принимает следующий вид:

$$\frac{A \omega^2 \cdot \sin \alpha}{g} \leq 1. \quad (2.23)$$

Полученное соотношение играет существенную роль в определении характера движения слоя цемента по поверхности вибрирующего лотка. В литературе [96] полученное условие называют параметром перегрузки. В зависимости от значений параметра перегрузки для движения одиночного тела можно определить скорости вибрационного перемещения в зависимости от допущений, сделанных для продольной и поперечной проекции скорости частицы до и после соударения с вибрирующей плоскостью [96]. Для допущений, сделанных выше можно записать следующие соотношения:

$$M_m \frac{d^2 x}{dt^2} + K \frac{dx}{dt} = 0, \quad (2.24)$$

$$M_m \frac{d^2 y}{dt^2} + K \frac{dy}{dt} = -g. \quad (2.25)$$

Вторые слагаемые в левых частях уравнений (2.24) и (2.25) представляют собой силу сопротивления движущего слоя цемента после отрыва от плоскости лотка в проекции на оси координат.

Если ввести обозначение:

$$\Omega = \frac{K}{M_m}, \quad (2.26)$$

то тогда уравнения (2.24) и (2.25) примут вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \Omega \frac{dx}{dt} = 0, \quad (2.27)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \Omega \frac{dy}{dt} = -\frac{g}{M_m}. \quad (2.28)$$

Решение однородного дифференциального уравнения (2.27) с постоянными коэффициентами имеет следующий вид:

$$x(t) = C_1 + C_2 e^{-\Omega t}. \quad (2.29)$$

Для нахождения произвольных постоянных в (2.29) C_1 и C_2 необходимо воспользоваться начальными условиями:

$$x(0) = 0, \quad \frac{dx}{dt}(t = t_0) = A\omega \cos \omega t_0 \cos \alpha, \quad (2.30)$$

здесь t_0 момент времени отрыва от плоскости лотка. Применив соотношение (2.30) к (2.29) получаем систему уравнений для нахождения произвольных постоянных:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = 0; \\ -\Omega \cdot C_2 = A\omega \cos \omega t_0 \cos \alpha. \end{cases} \quad (2.31)$$

Решение системы (2.31) позволяет получить следующие значения произвольных постоянных

$$C_1 = \frac{A\omega}{\Omega} \cos \omega t_0 \cos \alpha, \quad (2.32)$$

$$C_2 = -\frac{A\omega}{\Omega} \cos \omega t_0 \cos \alpha. \quad (2.33)$$

Подстановка (2.32), (2.33) в выражение (2.29) приводит к следующему результату:

$$x(t) = \frac{A\omega}{\Omega} \cos \omega t_0 \cos \alpha (1 - e^{-\Omega t}). \quad (2.34)$$

Решение неоднородного дифференциального уравнения (2.28) можно найти, используя метод вариации произвольной постоянной:

$$y(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) \cdot e^{-\Omega t}. \quad (2.35)$$

Применив данный метод к (2.35) получим систему для нахождения неизвестных функций $\lambda_1(t)$ и $\lambda_2(t)$:

$$\begin{cases} \lambda_1'(t) + \lambda_2'(t) e^{-\Omega t} = 0, \\ -\Omega \cdot \lambda_2'(t) e^{-\Omega t} = -g. \end{cases} \quad (2.36)$$

Интегрирование системы (2.36) приводит к следующему результату:

$$\lambda_1(t) = \frac{-g \cdot t}{\Omega} + C_{10}, \quad (2.37)$$

$$\lambda_2(t) = \frac{g}{\Omega^2} e^{\Omega t} + C_{20}. \quad (2.38)$$

Подстановка (2.37) и (2.38) в (2.35) позволяет записать следующее выражение:

$$y(t) = C_{10} + C_{20} e^{-\Omega t} + \frac{g}{\Omega^2} - \frac{g}{\Omega} t. \quad (2.39)$$

Для определения произвольных постоянных в (2.39) C_{10} и C_{20} необходимо воспользоваться начальными условиями:

$$y(0) = 0; \quad \frac{dy}{dt}(t = t_0) = A \omega \cos \omega t_0 \sin \alpha \quad (2.40)$$

Применив (2.40) к соотношению (2.39), находим:

$$C_{10} + C_{20} + \frac{g}{\Omega^2} = 0, \quad (2.41)$$

$$-\frac{g}{\Omega} - \Omega C_{20} = A \omega \cos \omega t_0 \sin \alpha. \quad (2.42)$$

На основании (2.42) находим:

$$C_{20} = -\frac{g}{\Omega^2} - \frac{A\omega}{\Omega} \cos \omega t_0 \sin \alpha. \quad (2.43)$$

Подстановка (2.43) в (2.41) дает следующий результат:

$$c_{10} = \frac{A\omega}{\Omega} \cos \omega t_0 \sin \alpha . \quad (2.44)$$

Подстановка (2.43) и (2.44) в (2.39) после несложных математических преобразований приводит к следующему результату:

$$y(t) = -\frac{g}{\Omega} t + \left(\frac{g}{\Omega^2} + \frac{A\omega}{\Omega} \cos \omega t_0 \sin \alpha \right) (1 - e^{-\Omega t}) . \quad (2.45)$$

Предположим далее, что величина

$$\Omega t = \frac{K}{M_m} t \ll 1 . \quad (2.46)$$

Применив (2.46) к полученным соотношениям (2.34) и (2.45) с учетом того, что

$$e^{-\Omega t} \approx 1 - \Omega t , \quad (2.47)$$

можно записать следующие соотношения:

$$x(t) \cong A\omega \cos \omega t_0 \cos \alpha \cdot t , \quad (2.48)$$

$$y(t) \cong A\omega \cos \omega t_0 \cos \alpha \cdot t . \quad (2.49)$$

На основании (2.48) и (2.49) скорость вибротранспортирования слоя цемента по поверхности лотка будет определяться следующим выражением:

$$V = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2} . \quad (2.50)$$

С учетом (2.48) и (2.49) находим (2.50):

$$V = A\omega \cos \omega t_0 . \quad (2.51)$$

Объемная пропускная способность вибрирующего лотка будет определяться соотношением:

$$M_{\text{л}} = l \cdot \Delta \cdot V = l \cdot \Delta \cdot A \cdot \omega \cdot \cos \omega t_0 . \quad (2.52)$$

На основании полученных соотношений (2.13) и (2.52) можно записать выражение, определяющие согласованную работу рассматриваемой пневмоструйной мельницы и питателя, состоящего из бункера и вибрирующего лотка:

$$l \cdot \Delta \cdot A \cdot \omega \cdot \cos \omega t_0 = \frac{2}{3} \pi \varphi_0 l_{mp} d_{mp} \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{P} RT} \cdot n_0, \quad (2.53)$$

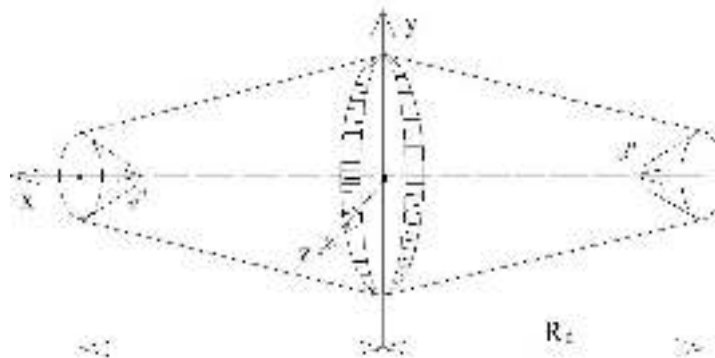
где n_0 – число разгонных трубок.

Таким образом, формула (2.53) определяет установившийся режим работы пневмоструйной мельницы и питателя в зависимости от её конструктивных и технологических параметров.

2.3. Движение частиц цемента в области взаимодействия встречных струй

Рассмотрим процесс взаимодействия частиц цемента при встречном взаимодействии струй, вытекающих из разгонных трубок. Движение частиц цемента, вытекающих из разгонной трубки со скоростью v_0 , будем рассматривать в рамках стоксовского приближения.

Для описания данного движения введем двумерную декартовую систему координат (xoy) с центром как показано на рисунке 2.4.



Рисунке 2.4 - Расчетная схема для описания изменения скорости частицы цемента при взаимодействии встречных струй

Предположим, что изменение скорости воздуха вдоль оси $v(x)$, истекающего из разгонной трубки в направлении к началу координат, убывает по линейному закону, а именно:

$$v(x) = \frac{-v_0 \cdot x}{R_0}, \quad (2.54)$$

здесь R_0 - расстояние от среза разгонной трубки до центральной области плоскости взаимодействия струй.

Учитывая, что после выхода частицы цемента из разгонной трубки на неё в основном действует сила сопротивления, значение которой в стоксовском приближении определяется следующим выражением:

$$f_c = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d(u(x) - \mathcal{G}(x)), \quad (2.55)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости воздуха;

d - диаметр частиц цемента, м;

$u(x)$ - скорость частицы цемента.

На основании (2.55) с учетом (2.54) уравнение движения частицы клинкера вдоль оси «ОХ»:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d \left(u(x) + \frac{\mathcal{G}(x)}{R_0} \right), x > 0, \quad (2.56)$$

где m - масса частиц цемента, значение которой записанной через плотность ρ_0 имеет вид:

$$m = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_0. \quad (2.57)$$

Подстановка (2.57) в (2.56) приводит к следующему результату:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + P_0 \frac{dx}{dt} + q \cdot x = 0. \quad (2.58)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$P_0 = \frac{18 \cdot \mu}{\rho_0 \cdot d^2}, \quad (2.59)$$

$$q = \frac{18 \cdot \mu \cdot \mathcal{G}_0}{\rho_0 \cdot d^2 \cdot R_0}. \quad (2.60)$$

Для нахождения общего решения линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка (2.58) необходимо составить характеристическое уравнение:

$$\lambda^2 + p\lambda + q = 0, \quad (2.61)$$

Корни характеристического уравнения (2.61) можно найти по следующим формулам:

$$\lambda_1 = -\frac{P_0}{2} - \sqrt{\frac{P_0^2}{4} - q}, \quad (2.62)$$

$$\lambda_2 = -\frac{P_0}{2} - \sqrt{\frac{P_0^2}{4} - q}. \quad (2.63)$$

В зависимости от знака подкоренного выражения в формулах (2.62) и (2.63) корни характеристического уравнения (2.61) будут вещественными, если:

$$\frac{P_0^2}{4} - q \geq 0. \quad (2.64)$$

Или комплексными, если соотношение (2.64) имеет противоположный знак:

$$\frac{P_0^2}{4} - q < 0. \quad (2.65)$$

В случае выполнения неравенства (2.64) решение дифференциального уравнения (2.58) можно записать в следующем виде:

$$x(t) = a_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + b_1 \cdot e^{\lambda_2 t}, \quad (2.66)$$

где a_1 и b_1 – постоянные, значения которых необходимо найти согласно начальным условиям:

$$x(t=0) = -R_0, \quad \frac{dx}{dt}(t=0) = \mathcal{G}_0. \quad (2.67)$$

Применив (2.67) к (2.66) получаем следующую систему алгебраических уравнений для нахождения постоянных a_1 и b_1 :

$$\begin{cases} a_1 + b_1 = -R_0, \\ a_1 \lambda_1 + b_1 \lambda_2 = \mathcal{G}_0. \end{cases} \quad (2.68)$$

Решение системы (2.68) приводит к следующему результату:

$$a_1 = -\frac{\mathcal{G}_0 + \lambda_2 R_0}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (2.69)$$

$$b_1 = \frac{\mathcal{G}_0 + \lambda_1 R_0}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (2.70)$$

Подстановка (2.69), (2.70) в решение (2.66) позволяет получить следующее соотношение:

$$x(t) = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[(\nu_0 + \lambda_1 \cdot R_0) e^{\lambda_2 t} - (\nu_0 + \lambda_2 \cdot R_0) e^{\lambda_1 t} \right]. \quad (2.71)$$

Полученное решение (2.71) имеет аperiodический характер и экспоненциально затухает с течением времени.

Рассмотрим случай, когда в соотношении (2.64) реализуется знак равенства. В этом случае характеристическое уравнение (2.61) имеет кратный корень, а именно:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = -\frac{P_0}{2} = \frac{9\mu}{\rho_0 d^2}, \quad (2.72)$$

а решение дифференциального уравнения (2.58) принимает вид:

$$x(t) = e^{-\frac{P_0}{2} t} (a_{10} + b_{10} \cdot t). \quad (2.73)$$

Применив к (2.73) начальные условия (2.67) можно получить следующие соотношения для постоянных коэффициентов a_{10} и b_{10} :

$$a_{10} = -R, \quad b_{10} = \mathcal{G}_0 - \frac{P_0}{2} R_0. \quad (2.74)$$

Подстановка (2.74) в решение (2.73) с учетом (2.59) приводит к следующему результату:

$$x(t) = e^{-\frac{9\mu}{\rho_0 d^2} t} \left[\left(\mathcal{G}_0 - \frac{9\mu}{\rho d^2} R_0 \right) \cdot t - R_0 \right]. \quad (2.75)$$

На основании полученного выражения (2.75) можно найти соотношение определяющее изменение скорости движения частицы цемента при вылете из разгонной трубки:

$$\frac{dx}{dt} = \exp\left(-\frac{9\mu}{\rho_0 d^2} \cdot t\right) \cdot \left[-\frac{9\mu}{\rho_0 d^2} \left(\mathcal{G}_0 - \frac{9\mu R_0}{\rho_0 d^2} \right) \cdot t + \mathcal{G}_0 \right]. \quad (2.76)$$

Если обозначить через t_n – время подлета частицы цемента к началу координат (точка лобового столкновения встречных частиц) тогда:

$$x(t_n) = 0. \quad (2.77)$$

Применив (2.77) к (2.75) находим:

$$t_n = \frac{R_0}{g_0 - \frac{9\mu R}{\rho_0 d^2}}. \quad (2.78)$$

Соотношение (2.78) приведем к следующему виду:

$$t_n = \frac{R_0}{g_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{d_*}{d} \right)^2 \right]}, \quad (2.79)$$

где введено следующее обозначение:

$$d_* = 3 \sqrt{\frac{\mu R_0}{\rho_0 g_0}}. \quad (2.80)$$

Подстановка (2.79) с учетом (2.80) позволяет привести формулу (2.76) к следующему виду:

$$\frac{dx}{dt}(t = t_n) = g_0 \cdot \exp\left(-\frac{d_*^2}{d^2} \cdot \frac{g_0}{R_0} \cdot t_n\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{d_*}{d} \right)^2 \right]. \quad (2.81)$$

Согласно (2.79) и (2.81) при $d \rightarrow d_*$, $t_n \rightarrow \infty$, а $\frac{dx}{dt}(t = t_n) \rightarrow 0$. Следовательно, величине d_* , которая имеет размер длины (метр) можно придать смысл предельно оптимального значения диаметра частицы цемента, которую можно разрушить встречным лобовым ударом. При этом в формуле (2.80) при учете встречного лобового удара необходимо $g_0 \rightarrow 2g_0$.

Рассмотрим случай, при котором выполняется условие (2.65). При выполнении условия (2.65) характеристическое уравнение (2.61) будет иметь два комплексных сопряженных корня:

$$\lambda_1 = -\frac{P_0}{2} + i\gamma \quad \text{и} \quad \lambda_2 = -\frac{P_0}{2} - i\gamma, \quad (2.82)$$

здесь

$$\gamma = \sqrt{\left| \frac{P_0^2}{4} - q \right|}. \quad (2.83)$$

На основании (2.82) решение дифференциального уравнения (2.58) можно представить в виде:

$$x(t) = e^{-\frac{\rho_0}{2}t} \cdot (a_{20} \cos \gamma t + b_{20} \sin \gamma t). \quad (2.84)$$

Полученное выражение (2.84) описывает затухающие колебания частиц встречных струй с частотой γ и некоторой амплитудой которые не испытывают прямых лобовых соударений. Анализ данного решения представляет наибольший интерес в области встречи частиц вблизи начала координат.

На основании вышесказанного найдем изменение амплитуды колебаний частиц материала. Для этого проведем следующие математические преобразования:

$$x(t) = \sqrt{a_{20}^2 + b_{20}^2} e^{-\frac{\rho_0}{2}t} \left(\frac{a_{20} \cdot \cos \gamma t}{\sqrt{a_{20}^2 + b_{20}^2}} + \frac{b_{20} \cdot \sin \gamma t}{\sqrt{a_{20}^2 + b_{20}^2}} \right). \quad (2.85)$$

Введем вспомогательный угол γ_0 согласно соотношениям:

$$\cos \gamma_0 = \frac{a_{20}}{\sqrt{a_{20}^2 + b_{20}^2}}, \quad (2.86)$$

$$\sin \gamma_0 = \frac{b_{20}}{\sqrt{a_{20}^2 + b_{20}^2}}. \quad (2.87)$$

Подстановка (2.86) и (2.87) в (2.85) с учетом (2.59) позволяет получить следующее выражение:

$$x(t) = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \cos(\gamma t - \gamma_0), \quad (2.88)$$

здесь введены следующие обозначения:

$$A = \sqrt{a_{20}^2 + b_{20}^2}, \quad (2.89)$$

$$\tau = \frac{\rho_0 \cdot d^2}{9 \cdot \mu}. \quad (2.90)$$

Величина $A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ определяет изменение амплитуды колебаний частицы относительно плоскости «ZOY» (см. рисунок 2.4).

На основании (2.88) находим закон изменения скорости частиц цемента:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{A}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\gamma \cdot t - \gamma_0) - A \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\gamma \cdot t - \gamma_0). \quad (2.91)$$

Применив (2.67) к соотношениям (2.88) и (2.91) получаем следующие соотношения:

$$A \cdot \cos \gamma_0 = -R_0, \quad (2.92)$$

$$-\frac{A}{\tau} \cos \gamma_0 + A \cdot \gamma \cdot \sin \gamma_0 = \mathcal{G}_0. \quad (2.93)$$

С учетом (2.86) и (2.87) находим, что:

$$a_{20} = -R_0, \quad b_{20} = \frac{\mathcal{G}_0 - R_0/\tau}{\gamma}, \quad (2.94)$$

и, следовательно:

$$A = R_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\left(\mathcal{G}_0 - \frac{R_0}{\tau}\right)^2}{R_0^2 \cdot \gamma^2}} = R_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{\mathcal{G}_0}{R_0} - \frac{1}{\tau}\right)^2}{\gamma^2}}, \quad (2.95)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_0 = -\frac{\frac{\mathcal{G}_0}{R_0} - \frac{1}{\tau}}{\gamma}. \quad (2.96)$$

Полученное решение (2.88), (2.91) с параметрами (2.95), (2.96) описывает колебательное движение частицы материала относительно плоскости встречи двух струй при выполнении условия (2.65), которое равносильно условию $d > d_{\min}$.

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

$$\frac{dx}{dt}(t = t_0) = 0. \quad (2.97)$$

Применив условие (2.97) к выражению (2.91) получаем:

$$-\frac{1}{\tau} \cdot \cos(\gamma \cdot t_0 - \gamma_0) - \gamma \sin(\gamma \cdot t_0 - \gamma_0) = 0. \quad (2.98)$$

На основании (2.98) имеем:

$$t_0 = \frac{1}{\gamma} \left(\gamma_0 + \frac{1}{\gamma \cdot \tau} \right). \quad (2.99)$$

Полученное соотношение (2.99) определяет время нахождения частицы в области, где проходят косые соударения частиц цемента с частицами цемента находящимися во встречной струе.

2.4. Разрушение частиц цемента при косых соударениях в области встречных струй

Разрушение частиц цемента при косых соударениях в области встречных струй, когда траектория движения частиц отклоняется от оси симметрии, можно рассматривать как процесс истирания. Такой процесс измельчения можно описать в рамках неоднородного Марковского процесса [37].

В рамках представления Марковского процесса предполагается, что интенсивность процесса измельчения пропорциональна частоте колебаний частицы цемента γ в произвольный момент времени t с коэффициентом пропорциональности R_x умноженной на линейную функцию от времени.

Согласно результату работы [37] дифференциальное уравнение, описывающее изменение диаметра частицы материала при разрушении истиранием имеет вид:

$$\frac{d}{dt}(d_x) = -\frac{\lambda_0}{3} \left(1 - \beta \frac{t}{t_0} \right) dx, \quad (2.100)$$

где d_x – текущее значение диаметра частицы цемента;

β - доля частиц, участвующих в колебательном движении;

t_0 - время пребывания в области, где проходят косые соударения;

λ_0 - коэффициент пропорциональности, равный:

$$\lambda_0 = K_x \cdot \gamma. \quad (2.101)$$

С математической точки зрения уравнение (2.100) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными. Разделение переменных в (2.100) с учетом (2.101) приводит к следующему результату:

$$\frac{d(d_x)}{dx} = -\frac{K_x \gamma}{3} \int_0^{t_0} \left(1 - \frac{\beta \cdot t}{t_0}\right) dt. \quad (2.102)$$

На основании (2.102) можно записать:

$$\int_{d_0}^{d_k} \left(d \frac{d_x}{dx}\right) = -\frac{K_x \cdot \gamma}{3} \int_0^{t_0} \left(1 - \frac{\beta \cdot t}{t_0}\right) dt, \quad (2.103)$$

где d_0 – начальное значение диаметра частицы цемента, мм;

d_k - конечное значение диаметра частицы цемента, мм.

Вычисление интегралов в выражении (2.103) приводит к результату:

$$\ln\left(\frac{d_k}{d_0}\right) = -\frac{K_x \cdot \gamma}{3} \cdot t_0 \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right). \quad (2.104)$$

Если в формуле (2.104) в качестве конечного значения диаметра частицы цемента поместить значение d_{\min} , тогда можно получить значение коэффициента истирания:

$$K_x = \frac{3 \ln\left(\frac{d_0}{d_{\min}}\right)}{\gamma \cdot t_0 \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)}. \quad (2.105)$$

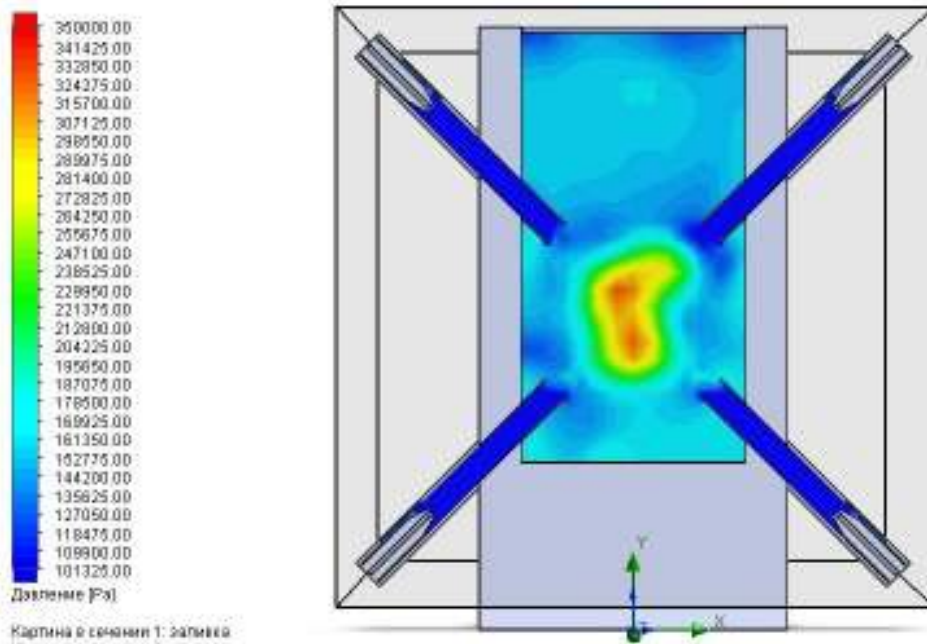
Таким образом, полученные соотношения (2.104) и (2.105) определяют закономерность изменения диаметра частицы цемента при косых соударениях и значение коэффициента истирания.

2.5. Анализ результатов расчета режимов работы пневмоструйной мельницы

На основании разработанных аналитических выражений с использованием программы Solidworks были выполнены расчеты интересующих нас параметров.

На рисунке 2.5 представлены расчетные схемы распределения давления в рассмотренной выше конструкции пневмоструйной мельницы. Также приведена цветовая диаграмма распределения давления в разрезе помольной камеры.

а)



б)

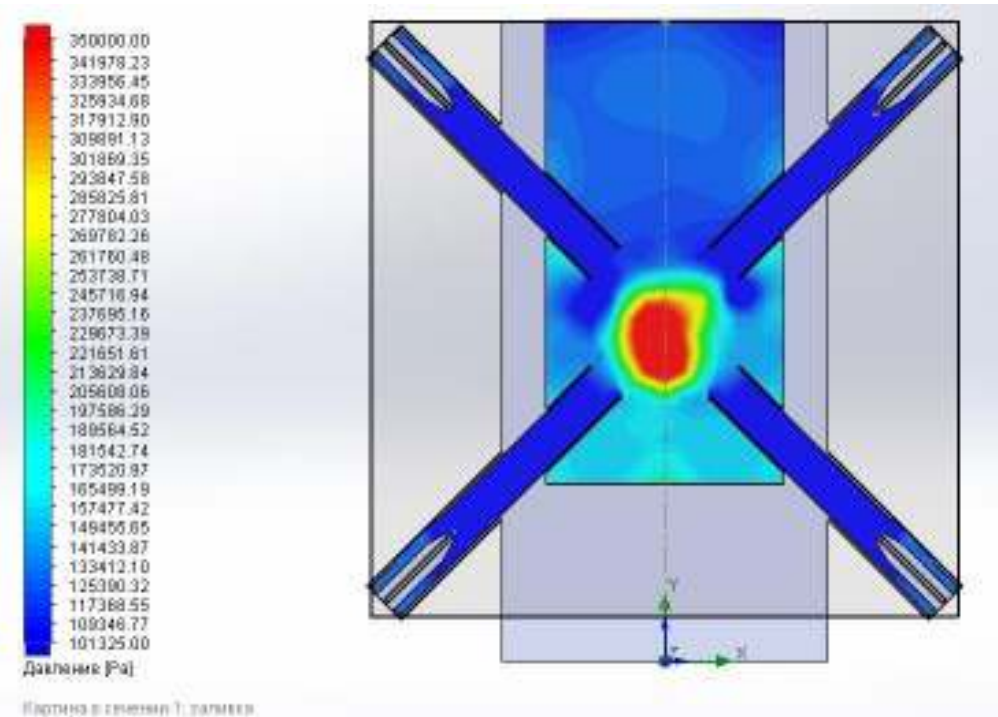


Рисунок 2.5 - Результаты численного моделирования распределения давлений в помольной камере пневмоструйной мельницы:

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

Поскольку нами было получено большое количество различных вариантов расчетных схем распределения давления и цветовых диаграмм для различных сочетаний конструктивно-технологических параметров, рассматриваемых в

дальнейшем в главах 3 и 4 настоящей работы, здесь представлены два наиболее характерных варианта.

Сопоставительный анализ распределения давлений в разрезе помольной камеры при минимальных диаметрах и длинах разгонных трубок и максимальных диаметрах и длинах разгонных трубок дает основание делать следующие выводы.

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

2.6. Выводы

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

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

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

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

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

6. Выполнен анализ результатов расчета режимов работы пневмоструйной мельницы. На основании полученных аналитических моделей установлено, что для наиболее эффективного измельчения для данной конструкции диаметр разгонных трубок должен лежать в пределах 28-34 мм, а длина разгонных трубок в пределах 250-264 мм.

3. ПЛАНИРОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Планирование экспериментальных исследований

С помощью планирования эксперимента можно затрачивая минимальное количество опытов, выбрать именно те условия, которые смогут привести выходные данные к рациональным значениям. При этом максимально эффективно использовать наиболее существенные факторы, влияющие на процесс измельчения, не усложняя при этом и без того достаточно сложный процесс получения массива экспериментальных данных [97, 98].

Чтобы получить продукт высокого качества, конструкция установки для тонкого измельчения микроцемента должна соответствовать характеру силового воздействия на изначально загружаемый материал. При разработке нового оборудования для помола вначале определяются с техническими и технологическими характеристиками механизма, необходимыми для получения конечного продукта заданного качества. Затем определяются с конструктивными параметрами установки для реализации необходимого силового воздействия.

Цель экспериментальных исследований – определение эксплуатационных и технологических характеристик исследуемой установки, оценка эффективности её работы применительно к заданному технологическому процессу и к заданным обрабатываемым материалам. Исследование процессов, протекающих при получении микроцемента в пневмоструйной мельнице, выполнялось в два этапа.

На основании данных диссертаций [17,53,85,99] на первом этапе был произведен анализ показателей эффективности работы исследованных ранее пневмоструйных мельниц, с целью определения количественного влияния на показатели эффективности работы следующих факторов: гранулометрического состава исходного материала, числа оборотов ротора сепаратора и вентиляторного колеса, габаритов помольной камеры, диаметров разгонных

трубок и сопел, количество материала, подаваемого питателем, скорости и расхода воздуха в разгонных трубках.

Основываясь на этом анализе, был выделен удельный вес каждого параметра в совокупном влиянии на процесс помола, а также выявлены наиболее существенные из параметров.

Так как не было выявлено пневмоструйных установок похожей конструкции, имеющих широкое применение в промышленных условиях, поэтому, с целью выявления уровней факторов и их парного влияния, были проведены поисковые эксперименты с использованием технологических параметров, полученных предыдущими исследователями на установках являющихся прототипами для исследуемого варианта по отдельным конструктивным признакам.

На втором этапе в соответствии с патентом была спроектирована и изготовлена пневмоструйная установка. Далее проводился ряд экспериментальных исследований по доизмельчению тампонажного цемента. При проведении экспериментов использовался метод наложения, который подразумевает наложение данных, полученных на первом этапе при тех же комбинациях изменяемых параметров с использованием критериев оценки результатов измельчения.

В ходе проведения эксперимента исследовалось влияние технологических режимов работы пневмоструйной мельницы на процесс тонкого помола цемента, а также изучалось повышение эффективности пылеулавливания в циклонах и рукавном фильтре. Изучение этих вопросов позволило установить наиболее рациональные конструктивные параметры установки, и осуществить определение рациональных технологических режимов работы установки для тонкого измельчения с пневмоструйной мельницей.

Программа проведения экспериментальных исследований по тонкому измельчению цемента в пневмоструйной установке, в соответствии с поставленными задачами и целью работы, включала в себя следующие этапы:

- разработка и изготовление экспериментальной полупромышленной модели на основании предложенного патента на полезную модель;
- проведение ряда поисковых экспериментов с целью наработки массива экспериментальных данных, которые бы послужили для обоснования выбора построенных математических моделей;
- определение наиболее существенных технологических и конструктивных, изменяющихся и подвергающихся контролю факторов или параметров при работе установки;
- выбор критериев оценки эффективности процесса тонкого измельчения;
- выбор плана проведения многофакторного эксперимента, а также определение уровней и интервалов варьирования исследуемых факторов;
- определение показателей качества готового продукта.

На рисунке 3.1 представлен порядок проведения лабораторных, а также экспериментальных исследований процесса тонкого помола цемента в пневмоструйной установке.

В качестве функций отклика, характеризующих технологические и энергетические показатели работы противоструйной установки приняты:

- массовая производительность циклона марки СЦН-40-300 Q_1 , измеряемая в кг/ч;
- массовая производительность рукавного фильтра ФРКИ-10 Q_2 , измеряемая в кг/ч;
- удельная поверхность S измеряемая в $\text{см}^2/\text{г}$, определяемая с помощью лазерного прибора для измерения частиц ANALYSETTE 22 NanoTec plus.

При использовании идеализации динамической модели, опираясь на моделирование и математическое планирование решалась задача оптимизации эксперимента. Для выполнения данной цели использовался композиционный план факторного эксперимента, который позволил получить нелинейные математические модели исследуемой установки.



Рисунок 3.1 - Алгоритм проведения лабораторных и экспериментальных исследований процесса тонкого помола цемента в пневмоструйной установке

3.2. Оборудование для экспериментальных исследований и средства контроля

Экспериментальное изучение процесса тонкого измельчения цемента в пневмоструйной установке, входящей в состав технологического комплекса для помола, подразумевает специальное экспериментальное оборудование, которое должно отвечать следующим условиям:

- варьированность исследуемых параметров, а также режимов работы установки в необходимых пределах;
- обеспеченность необходимой точностью измерений.

С учетом указанных требований, программы и плана экспериментов был разработан и изготовлен полупромышленный вариант технологического комплекса с пневмоструйной мельницей для исследования процесса тонкого помола цемента.

На рисунке 3.2 представлена схема технологического комплекса.

Комплекс содержит: вибропитатель 1, пневмоструйную мельницу 2, сепаратор 3 с загрузочной воронкой, циклон 4, рукавный фильтр 5 и вытяжной вентилятор 6.

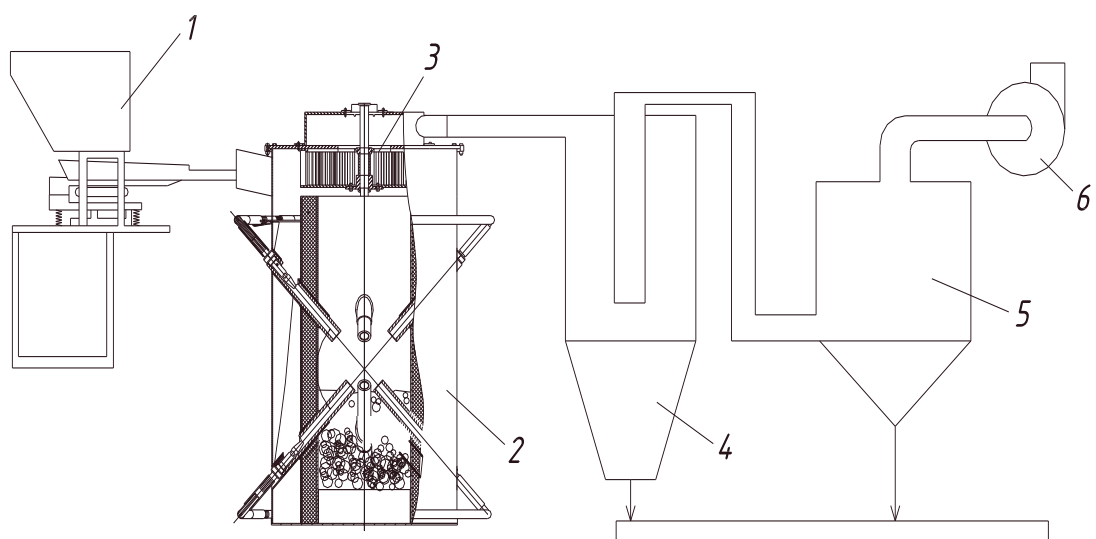


Рисунок 3.2 - Схема технологического комплекса:

1 - вибропитатель, 2 - пневмоструйная мельница, 3 - сепаратор с загрузочной воронкой,
4 - циклон, 5 - рукавный фильтр, 6 - вытяжной вентилятор

Общий вид установки представлен на рисунке 3.3. Установка состоит из следующих основных узлов: блок помола 1, классификатор 2, коллектор подачи 3, электродвигатель привода классификатора 4, защитный кожух клиноременной передачи 5.

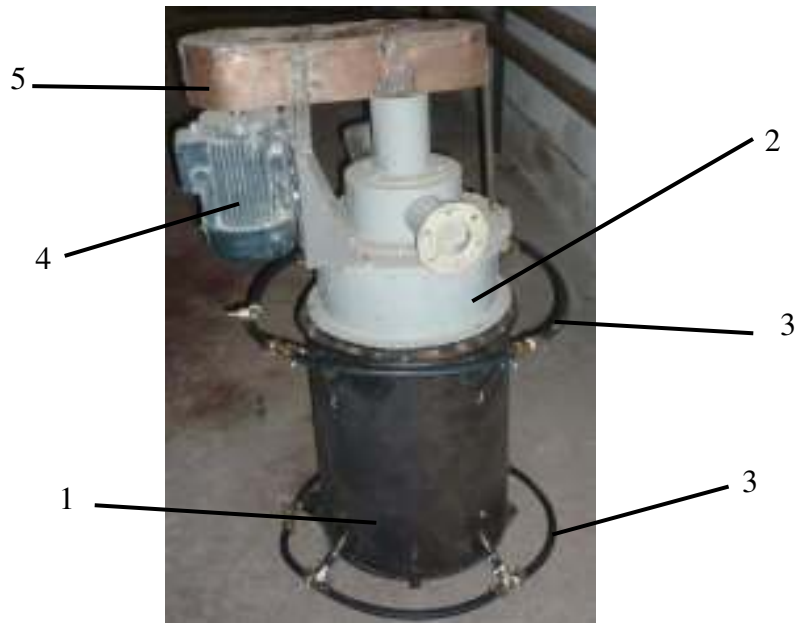


Рисунок 3.3 - Пневмоструйная установка для тонкого измельчения

На рисунке 3.4 представлена фотография блока помола пневмоструйной установки.

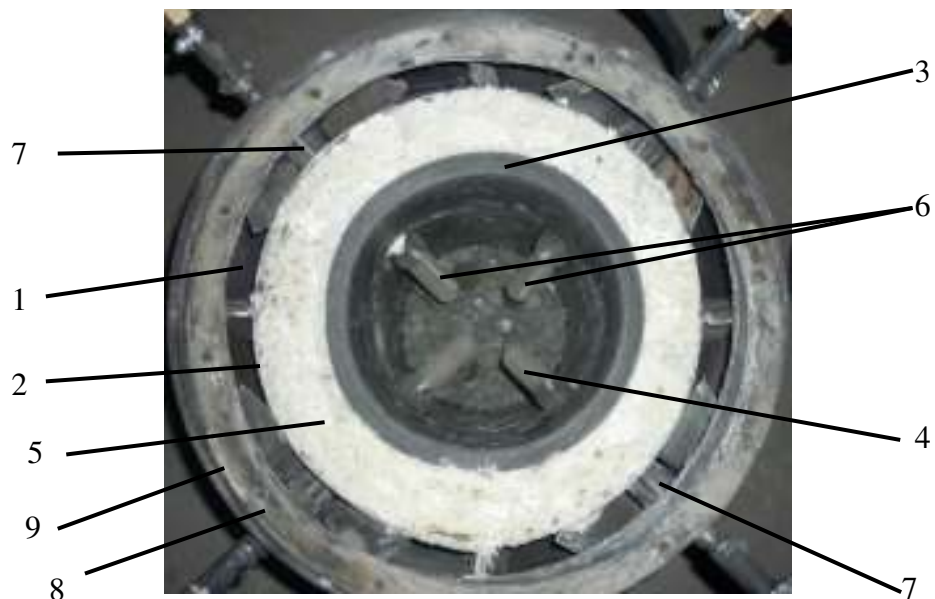


Рисунок 3.4 - Общий вид блока помола установки для пневмоструйного измельчения.

1 – наружный корпус, 2 – средний корпус, 3 – внутренний корпус, 4 – нижнее днище,
5 – шумоизолирующий слой, 6 – разгонные трубки, 7 – эжекторные отсеки,
8 – верхний фланец, 9 – прокладка резиновая

Принцип действия блока помола описан в разделе 2.4 на примере описания патента [93].

В промышленном комплексе комплекса также использовались: циклон СЦН-40-300 (рисунок 3.5), рукавный фильтр ФРКИ-10 (рисунок 3.6) и вентилятор высокого давления СКАТ/2-801 (рисунок 3.7).



Рисунок 3.5 - Циклон СЦН-40-300



Рисунок 3.6 - Рукавный фильтр ФРКИ-10



Рисунок 3.7 - Вентилятор высокого давления СКАТ/2-801

Для проведения исследований применялся набор разгонных трубок длиной от 236 до 264 мм и внутренним диаметром от 22 до 34 мм (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 - Разгонные трубки

Регулирование подачи сжатого воздуха осуществлялось дросселями – кранами шарового типа. При измерении рабочего давления воздуха от компрессора использовались манометры МТП-100.

Для регулирования числа оборотов сепаратора и вентилятора использовались частотные преобразователи типа LS600-4010 компании Long Shenq Electronic Co LTD.

3.3. Методика проведения экспериментальных исследований и измерений

Учитывая сложность процессов, происходящих в пневмоструйной установке, а также на основании результатов серии пробных экспериментов был выбран центральный композиционный ортогональный план полного факторного эксперимента ПФЭ ЦКОП 2⁴. Преимущество данного плана в возможности получения несмешанных друг с другом оценок коэффициентов при парных произведениях факторов. Кроме того, данный план позволяет получить парные произведения в ядре плана, не смешанные с линейными членами [97, 100].

Данный план позволяет получить одинаковую дисперсию предсказанных значений функции отклика во всех равноудаленных от центра плана эксперимента

точках. На основании ПФЭ ЦКОП 2⁴ возможно получение регрессионной модели вида (3.1) [4, 44]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (3.1)$$

где y – расчетное значение функции отклика;

a_0 – свободный коэффициент;

a_i – коэффициенты при линейной зависимости;

a_{ij} – коэффициенты при парном взаимодействии факторов.

Коэффициенты регрессии рассчитываются методом наименьших квадратов. Коэффициенты регрессии определяются на основании минимизации суммы квадратов отклонений между экспериментальными ($y_э$) и расчетными (y_p) значениями функции отклика,

$$\sum (y_э - y_p)^2 = \min. \quad (3.2)$$

«Величина и знак коэффициента в уравнении регрессии определяют его вклад в формирование функции отклика, позволяют выявить наиболее существенные эффекты взаимодействия факторов. Статистическая оценка значимости коэффициентов полученной математической модели производилась с помощью критерия Стьюдента, а проверка на адекватность – с помощью критерия Фишера. В случае невыполнения условия значимости коэффициент регрессии считался незначимым и приравнивался к нулю. Критерий Фишера представляет собой отношение дисперсии адекватности ($S_{ад}$) к дисперсии воспроизводимости опыта (S_y), при этом его значение должно быть меньше соответствующего (при уровне значимости 5 %)» [97].

В качестве исследуемых факторов при проведении экспериментов для тонкого измельчения цемента в пневмоструйной установке приняты: число оборотов ротора сепаратора мельницы, мин^{-1} ; число оборотов ротора вентилятора мельницы, мин^{-1} ; длина разгонной трубки, мм ; диаметр разгонных трубок, мм .

Для определения влияния этих факторов на производительность циклона, производительность рукавного фильтра и удельную поверхность использовалась

экспериментальная пневмоструйная установка для измельчения цемента, оснащенная дополнительным оборудованием. В соответствии с планом принято пять уровней факторов: 1 – нижний; 0 – средний; +1 – верхний; -1,414 и +1,414 – звёздные. Данные уровни факторов выполняются на экспериментальной установке и соотносятся с реальными условиями пневмоструйной установки для тонкого помола цемента.

Факторы, подвергающиеся исследованию, и уровни их варьирования представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Исследуемые факторы и уровни варьирования ПФЭ ЦКОП 2⁴

Исследуемые факторы	Кодированное значение	Уровни варьирования				
		-1,414	-1	0	1	1,414
1. Число оборотов ротора сепаратора мельницы, мин^{-1} .	x_1	1100	1200	1450	1700	2050
2. Число оборотов ротора вентилятора мельницы, мин^{-1} .	x_2	2400	2510	2810	3110	3220
3. Длина разгонной трубки, мм.	x_3	236	240	250	260	264
4. Диаметр разгонных трубок, мм.	x_4	22	24	28	32	34

В течение проведения экспериментов оставались неизменными: расход и давление воздуха, подаваемого к соплам установки. Диаметр сопел принимался равным 4 мм в соответствии с исследованиями [52]; диаметр камеры измельчения $D=265$ мм; внутренние диаметры загрузочного и разгрузочного патрубков $D_{ЗЦ}=D_{РЦ}=57$ мм.

Матрица планирования для ПФЭ ЦКОП 2⁴, на основании которой проводились экспериментальные исследования, представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Матрица планирования ПФЭ ЦКОП 2⁴

№ опыта	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1
17	-α	0	0	0
18	+α	0	0	0
19	0	-α	0	0
20	0	+α	0	0
21	0	0	-α	0
22	0	0	+α	0
23	0	0	0	-α
24	0	0	0	+α
25	0	0	0	0

Для получения достоверных результатов каждый этап исследования включал в себя анализ нескольких проб, взятых в одинаковых условиях и при идентичных режимах и параметрах измельчения.

Для установления необходимого количества проб порошка на каждом из режимов работы, воспользовались статистическим путем, беря в расчет величину коэффициента вариации $k_{вар}$, характерную для данного метода испытаний, и требуемую степень точности результатов $k_{дон}$. При постоянных режимах работы

предварительно было проведено 12 опытов. Исходя из соотношения $k_{don}/k_{вар}=1,23$ для процесса измельчения, с надежностью экспериментальных результатов 0,95 установили необходимое число повторений каждого опыта, равное 3.

Порядок проведения экспериментов в ходе выполнения каждой серии опытов определялся с помощью принципа рандомизации. Это позволило сделать влияние мешающих факторов случайными [97].

При проведении экспериментов физико-химический состав активируемого и футеровочного материала оставался неизменным.

3.4. Характеристика исходного сырья

При проведении эксперимента по процессу измельчения цемента в пневмоструйной установке, использовался тампонажный цемент ООО «Дюккерхофф – Сухой Лог». Химико-минералогический состав клинкера приведен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Химико-минералогический состав тампонажного цемента ООО «Дюккерхофф – Сухой Лог».

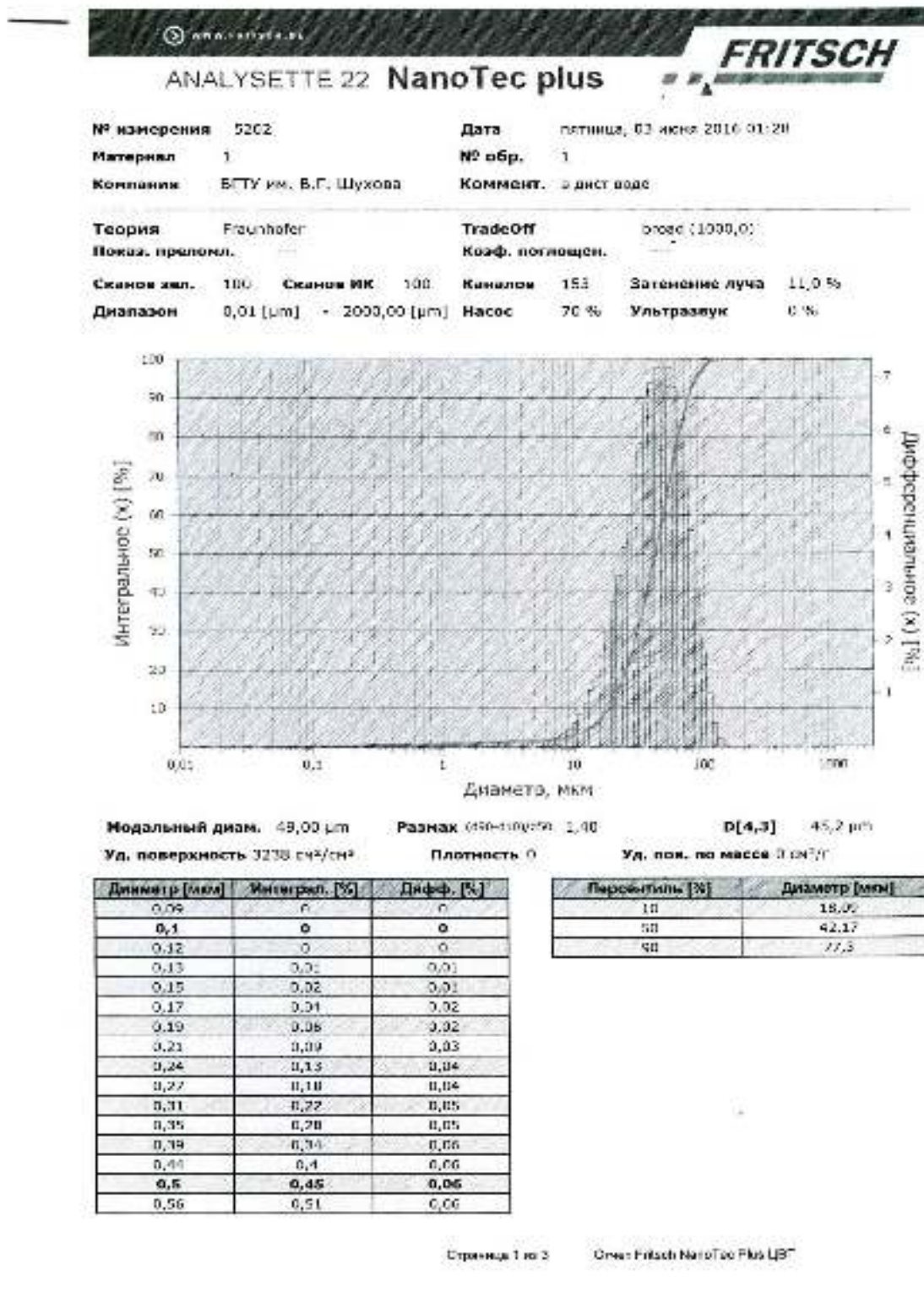
Результаты химического анализа

Фактич. значение	Требования	
	API Spec 10A класс G тип высоко-сульфато-устойчивый (HSR)	ГОСТ 1581 - 96 ПЦГ I-G-CC-1
% Оксид магния (MgO)	2.90	тах. 6.0 макс. 5.0 +)
% Трехокись серы (SO ₃)	2.80	тах. 3.0 макс. 3.0 +)
% Потери при прокаливании	0.58	тах. 3.0 макс. 3.0 +)
% Нерастворимый остаток	0.29	тах. 0.75 макс. 0.75 +)
% Трехкальцевый силикат (3CaO*SiO ₂)	54.0	тах. 6.5 макс. 65 +) min. 4.8 мин. 48 +)
% Трехкальцевый алюминат (3CaO * Al ₂ O ₃)	2.4	тах. 3.0 макс. 3.0 +)
% (C ₄ AF + C ₃ A)	16.2	-
Соотношение Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃ – TM – P	0.85	
Если глиноземистый модуль TM (=P) > 0.64, то % (C ₄ AF + 2 C ₃ A)	18.6	тах. 2.4 макс. 24 +)
Если глиноземистый модуль TM (=P) < 0.64, то % (C ₄ AF + C ₂ F)		тах. 2.4
% Na ₂ O - эквивалент = (0.658 % K ₂ O + % Na ₂ O)	0.57	тах. 0.75 макс. 0.75 +)

+) в клинкере

Гранулометрический состав исходного и активированного материала определялся с помощью лазерного анализатора Analysette 22 NanoTec plus.

Таблица 3.4 - Гранулометрический состав исходного материала



Результаты гранулометрии получаемого продукта S_{y0} представлены в разделе 4.

3.5 Выводы

1. В соответствии с поставленными задачами была определена методика проведения экспериментальных исследований по измельчению цемента в пневмоструйной мельнице, также изучены физико-химические характеристики исходного измельчаемого материала.

2. Для осуществления экспериментальных исследований спроектирован и изготовлен опытно-промышленный образец технологического комплекса для получения микроцемента.

3. Подобраны и описаны характеристики используемых при проведении экспериментов оборудования и контрольно-измерительного оборудования.

4. Выбран и обоснован план проведения многофакторного эксперимента, определены функции отклика, исследуемые факторы и уровни их варьирования.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЦЕМЕНТА В ПНЕВМОСТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

4.1. Получение уравнений регрессии, описывающих зависимость Q_1, Q_2, S от варьируемых факторов

Проведение экспериментальных исследований необходимо для оценки достоверности выведенных в диссертации аналитических выражений, а также эффективности использования предложенной конструкции мельницы применительно к производству тампонажных микропорошков.

С целью установления основных параметров, влияющих на режим процесса тонкого измельчения в пневмоструйной мельнице и выявления параметров оптимизации, были проведены эксперименты в соответствии с планом, описанным в главе 3.

Для снижения влияния систематических ошибок эксперименты проводились в случайной последовательности, определяемой рандомизацией.

Экспериментальные исследования по измельчению цемента проводились в пневмоструйной мельнице с целью определения влияния на показатели эффективности ее работы следующих варьируемых факторов: числа оборотов ротора сепаратора мельницы, числа оборотов ротора вентилятора мельницы, длины разгонной трубки и диаметров разгонных трубок.

В таблице 4.1 представлены усредненные результаты экспериментальных исследований.

Используя результаты проведенных экспериментов, была произведена их статистическая обработка с использованием программ Statistica и MS Excel и были получены уравнения регрессии в виде $Q_1(x_1; x_2; x_3; x_4)$, $Q_2(x_1; x_2; x_3; x_4)$, $S(x_1; x_2; x_3; x_4)$. На основании посчитанных результатов, были рассчитаны коэффициенты

уравнений регрессии, составлены уравнения, описывающие процессы тонкого измельчения, оценена их адекватность.

Таблица 4.1. Результаты экспериментальных исследований

№ п.п.	Матрица плана						
	x_1	x_2	x_3	x_4	Q циклона кг/ч	Q фильтра, кг/ч	S , см ² /г
1	2	3	4	5	6	7	8
1	+1	+1	+1	+1	72	14	12079
2	-1	+1	+1	+1	72,6	14,8	11760
3	+1	-1	+1	+1	71,7	15,3	11990
4	-1	-1	+1	+1	72,1	13,9	12035
5	+1	+1	-1	+1	73,1	12,9	12343
6	-1	+1	-1	+1	71,1	14,2	12010
7	+1	-1	-1	+1	68	14,9	12306
8	-1	-1	-1	+1	73	12,3	13790
9	+1	+1	+1	-1	70	12,1	12900
10	-1	+1	+1	-1	67,5	10,9	12009
11	+1	-1	+1	-1	70,9	14,9	11877
12	-1	-1	+1	-1	71	13,1	12000
13	+1	+1	-1	-1	72,3	14	12701
14	-1	+1	-1	-1	70,6	13,3	11970
15	+1	-1	-1	-1	70	12,7	12100
16	-1	-1	-1	-1	71,8	10,9	11587
17	1,414	0	0	0	66,4	7,9	11565
18	-1,414	0	0	0	69,9	9,5	11073
19	0	1,414	0	0	73,9	10,3	11360
20	0	-1,414	0	0	70,1	9,3	11430
21	0	0	1,414	0	70,9	12,1	11767
22	0	0	-1,414	0	71,2	11,7	12990
23	0	0	0	1,414	70	10	11222
24	0	0	0	-1,414	68,8	9,7	11305
25	0	0	0	0	68,9	10,30	11907

Уравнение регрессии, характеризующее зависимость производительности циклона от исследуемых факторов в кодированной форме имеет вид:

$$Q_1 = 72,856 + 0,303 \cdot x_1 - 0,725 \cdot x_2 + 0,576 \cdot x_3 + 0,767 \cdot x_4 - \\ - 0,41x_1^2 - 0,66 \cdot x_2^2 - 0,385 \cdot x_3^2 - 0,785 \cdot x_4^2 - 0,4 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,375 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ + 0,763 \cdot x_1 \cdot x_4 - 1,625 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,075 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,225 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (4.1)$$

Уравнение регрессии, характеризующее зависимость производительности рукавного фильтра от исследуемых факторов в кодированной форме имеет вид:

$$Q_2 = 14,04 + 0,382 \cdot x_1 - 0,953 \cdot x_2 + 0,514 \cdot x_3 + 1,24 \cdot x_4 + \\ + 0,225 \cdot x_1^2 - 0,575 \cdot x_2^2 - 0,625 \cdot x_3^2 - 1,325 \cdot x_4^2 - \\ - 0,025 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,638 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,113 \cdot x_1 \cdot x_4 - \\ - 0,3 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,05 \cdot x_2 \cdot x_4 + 1,375 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (4.2)$$

Уравнение регрессии, характеризующее зависимость удельной поверхности получаемого микроцемента цемента от исследуемых факторов в кодированной форме имеет вид:

$$S = 12490,855 + 56,98 \cdot x_1 - 143,012 \cdot x_2 + 182,363 \cdot x_3 + 265,85 \cdot x_4 + \\ + 136,387 \cdot x_1^2 - 304,246 \cdot x_2^2 - 44,667 \cdot x_3^2 - 421,781 \cdot x_4^2 - \\ - 20,813 \cdot x_1 \cdot x_2 + 198,188 \cdot x_1 \cdot x_3 + 3,938 \cdot x_1 \cdot x_4 - \\ - 77,438 \cdot x_2 \cdot x_3 - 37,438 \cdot x_2 \cdot x_4 + 36,063 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (4.3)$$

Для дальнейшего исследования уравнений регрессии и для удобства изображения графических зависимостей, величины кодированных значений входных параметров x_1, x_2, x_3, x_4 целесообразно представить в виде размерных величин n_1, n_2, l_T, d_T .

Преобразование, согласно [100], осуществляется по формуле:

$$x_j = \frac{X_j - X_{j0}}{\Delta X_j}, \quad (4.4)$$

где x_j - кодированное значение j -го фактора;

X_j - натуральное значение фактора;

X_{j0} - натуральное значение основного уровня фактора;

ΔX_j - интервал варьирования j -го фактора.

Тогда кодированные значения факторов x_1, x_2, x_3, x_4 для любых натуральных его значений могут быть рассчитаны по формулам:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{n_1 - 1450}{250}; \\ x_2 = \frac{n_2 - 2810}{300}; \\ x_3 = \frac{l_T - 250}{10}; \\ x_4 = \frac{d_T - 28}{4}. \end{cases}$$

После преобразований получаем уравнения регрессии, описывающие процесс тонкого измельчения цемента в пневмоструйной установке в натуральных величинах.

Зная, что знак и величина коэффициентов в уравнении регрессии определяют его вклад в формирование функции отклика, можно выявить наиболее существенные эффекты взаимодействия факторов. Значимость каждого коэффициента оценивалась по критерию Стьюдента, для чего определялись дисперсии коэффициентов по методикам [98]. При табличном значении коэффициента Стьюдента меньше расчетного, коэффициент выбраковывался.

Уравнение регрессии, характеризующее зависимость производительности циклона имеет вид:

$$\begin{aligned} Q_1 = & -235,65 - 0,023n_1 + 0,062n_2 + 1,849l_T - 0,031d_T + \\ & + 0,53 \cdot 10^{-5}n_1n_2 + 0,15 \cdot 10^{-3}n_1l_T + 0,763 \cdot 10^{-3}n_1d_T - \\ & - 0,54 \cdot 10^{-4}n_2l_T + 0,625 \cdot 10^{-4}n_2d_T + 0,0056l_Td_T - \\ & - 0,68 \cdot 10^{-5}n_1^2 - 0,797 \cdot 10^{-5}n_2^2 - 0,004l_T^2 - 0,044d_T^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Определим значимость факторов для производительности помола в циклоне. Значимость факторов можно вычислить с помощью коэффициента эластичности, показывающего, на сколько процентов изменяется функция, если аргумент изменяется на единицу (на 1%).

$$\mathcal{E}_i = \frac{a_i x_{i0}}{a_0}, \quad (4.6)$$

где x_{i0} - натуральное значение основного (нулевого) уровня фактора;

a_0, a_i - коэффициенты регрессии.

Значимость факторов определяется выражением:

$$\xi = \frac{\partial_i}{\partial_{\Sigma}} \cdot 100\% . \quad (4.7)$$

Для Q_1 :

$$\partial_{n_1} = \frac{0,023 \cdot 1450}{235,65} = 0,142, \quad \partial_{n_2} = \frac{0,062 \cdot 2810}{235,65} = 0,739 ,$$

$$\partial_{t_r} = \frac{1,849 \cdot 250}{235,65} = 1,962, \quad \partial_{d_r} = \frac{0,031 \cdot 28}{235,65} = 0,004 ;$$

$$\partial_{\Sigma} = 2,847 ;$$

$$\xi_{n_1} = \frac{\partial_{n_1}}{\partial_{\Sigma}} \cdot 100\% = 4,99\% ,$$

$$\xi_{n_2} = \frac{\partial_{n_2}}{\partial_{\Sigma}} \cdot 100\% = 25,96\% ,$$

$$\xi_{t_r} = \frac{\partial_{t_r}}{\partial_{\Sigma}} \cdot 100\% = 68,91\% ,$$

$$\xi_{d_r} = \frac{\partial_{d_r}}{\partial_{\Sigma}} \cdot 100\% = 0,14\% .$$

Визуально полученные результаты можно представить в виде диаграммы (рисунок 4.1).

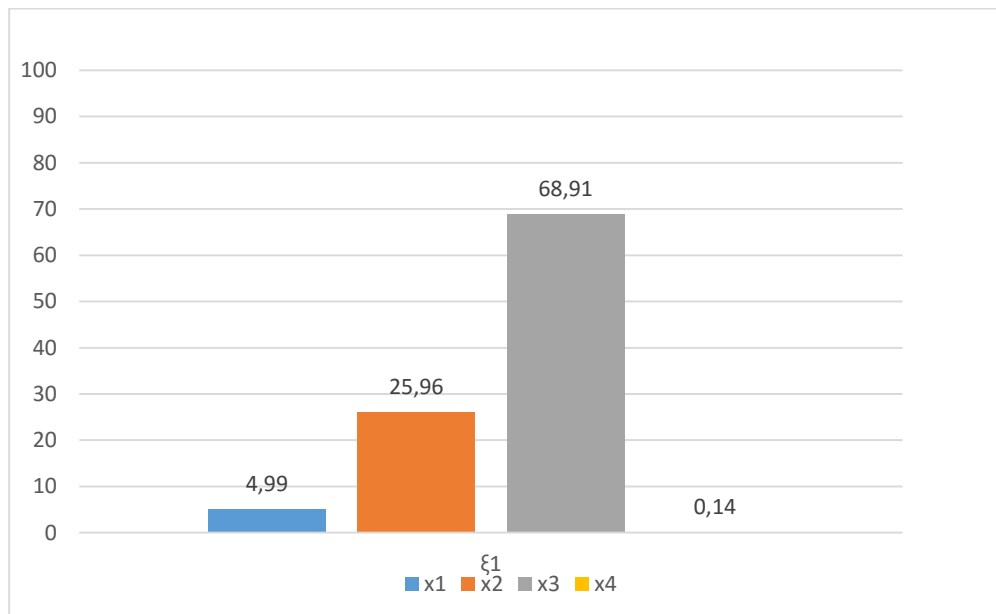


Рисунок 4.1 - Диаграмма значимости варьируемых факторов на производительность циклона Q_1

Анализируя диаграмму можно отметить, что на изменение показателя производительности циклона преимущественно влияет l_T - длина разгонных трубок (68,91%) и n_2 – число оборотов ротора вентилятора (25,96%). Число оборотов ротора сепаратора мельницы n_1 оказывает незначительное влияние на производительность циклона (4,99%), а d_T – диаметр разгонных трубок практически не оказывает никакого влияния (0,14%).

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 которой измельчаемый материал разгоняется, запасаясь 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, характеризующее зависимость производительности по рукавному фильтру, в натуральных величинах имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Q_2 = & -491,508 - 0,067n_1 + 0,062n_2 + 3,257 l_T + 3,733 d_T - \\
 & - 0,33 \cdot 10^{-6} n_1 n_2 + 0,255 \cdot 10^{-3} n_1 l_T - 0,113 \cdot 10^{-3} n_1 d_T - \\
 & - 0,1 \cdot 10^{-3} n_2 l_T + 0,417 \cdot 10^{-4} n_2 d_T + 0,0034 l_T d_T + \\
 & + 0,3 \cdot 10^{-5} n_1^2 - 0,73 \cdot 10^{-5} n_2^2 - 0,007 l_T^2 - 0,076 d_T^2
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Определим значимость факторов для производительности рукавного фильтра по выражениям (4.6-4.7).

Для Q_2 :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E}_{n_1} &= \frac{0,066 \cdot 1450}{491,508} = 0,195, & \mathcal{E}_{n_2} &= \frac{0,062 \cdot 2810}{491,508} = 0,354, \\
 \mathcal{E}_{l_T} &= \frac{3,257 \cdot 250}{491,508} = 1,657, & \mathcal{E}_{d_T} &= \frac{3,733 \cdot 28}{491,508} = 0,213;
 \end{aligned}$$

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = 2,419;$$

$$\xi_{n_1} = \frac{\mathcal{E}_{n_1}}{\mathcal{E}_{\Sigma}} \cdot 100\% = 8,06\% ,$$

$$\xi_{n_2} = \frac{\mathcal{E}_{n_2}}{\mathcal{E}_{\Sigma}} \cdot 100\% = 14,63\% , ,$$

$$\xi_{l_T} = \frac{\mathcal{E}_{l_T}}{\mathcal{E}_{\Sigma}} \cdot 100\% = 68,5\% ,$$

$$\xi_{d_T} = \frac{\mathcal{E}_{d_T}}{\mathcal{E}_{\Sigma}} \cdot 100\% = 8,81\% .$$

Визуально полученные результаты представим в виде диаграммы (рисунок 4.2).

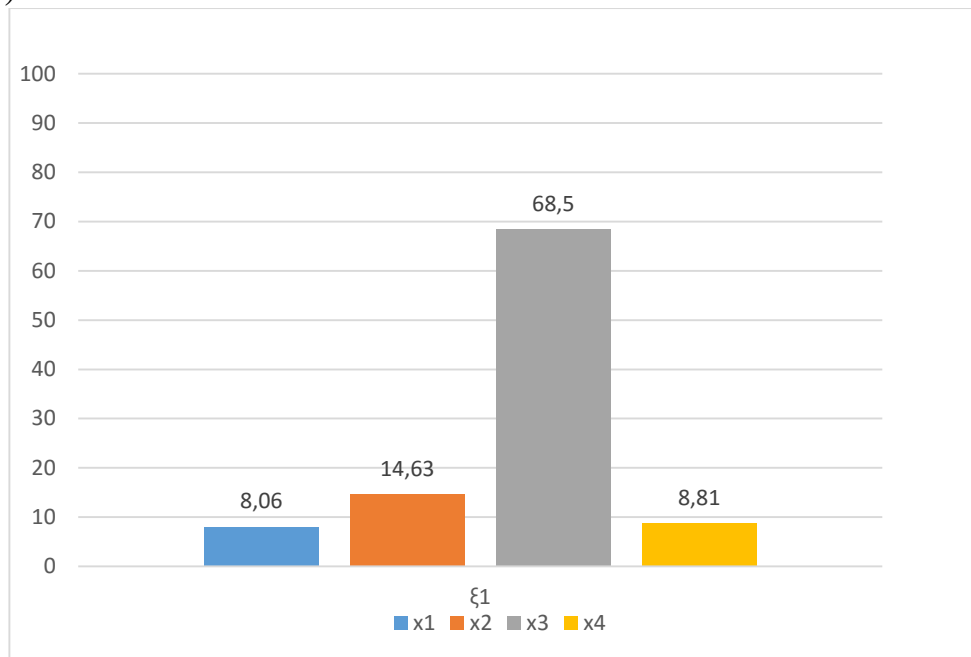


Рисунок 4.2 - Диаграмма значимости варьируемых факторов на производительность фильтра Q_2

Как видно из диаграммы, на изменение показателя массовой производительности рукавного фильтра наиболее существенно влияет l_T - длина разгонных трубок (68,5%) и n_2 - число оборотов ротора вентилятора (14,63%). Несколько увеличилось влияние числа оборотов ротора сепаратора n_1 с 4,99% до 8,06%. И значительно возросло влияние диаметра разгонных трубок d_T с 0,14% до 8,81%.

Полученные значения влияния обуславливаются противоточной конструкцией мельницы, в которой дисперсность конечного продукта в большей степени зависит от длины разгонных трубок. Влияние числа оборотов ротора вентилятора

можно объяснить тем, что на эффективность пылеочистки рукавного фильтра, не в последнюю очередь, влияет скорость движения воздуха в фильтре. Увеличение значения 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, характеризующее зависимость тонкости помола, от исследуемых факторов в натуральных величинах имеет вид:

$$\begin{aligned}
 S = & -59163,52 - 24,844n_1 + 28,405n_2 + 235,58 l_T + 1260,347 d_T - \\
 & - 0,278 \cdot 10^{-3} n_1 n_2 + 0,079 n_1 l_T + 0,0039 n_1 d_T - \\
 & - 0,026 n_2 l_T - 0,031 n_2 d_T + 0,902 l_T d_T + \\
 & + 0,002 n_1^2 - 0,0037 n_2^2 - 0,57 l_T^2 - 23,898 d_T^2
 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Определим значимость факторов для удельной поверхности с использованием выражений (4.6-4.7).

Для S :

$$\mathcal{E}_{n_1} = \frac{24,844 \cdot 1450}{59163,52} = 0,609, \quad \mathcal{E}_{n_2} = \frac{28,405 \cdot 2810}{59163,52} = 1,349,$$

$$\mathcal{E}_{l_T} = \frac{235,58 \cdot 250}{59163,52} = 0,995, \quad \mathcal{E}_{d_T} = \frac{1260,347 \cdot 28}{59163,52} = 0,596;$$

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = 3,549;$$

$$\xi_{n_1} = \frac{\mathcal{E}_{n_1}}{\mathcal{E}_{\Sigma}} \cdot 100\% = 17,16\%,$$

$$\xi_{n_2} = \frac{\mathcal{E}_{n_2}}{\mathcal{E}_{\Sigma}} \cdot 100\% = 38,01\%,$$

$$\xi_{l_T} = \frac{\mathcal{E}_{l_T}}{\mathcal{E}_{\Sigma}} \cdot 100\% = 28,04\%,$$

$$\xi_{d_T} = \frac{\mathcal{E}_{d_T}}{\mathcal{E}_{\Sigma}} \cdot 100\% = 16,79\%.$$

Визуально полученные результаты представим в виде диаграммы (рисунок 4.3).

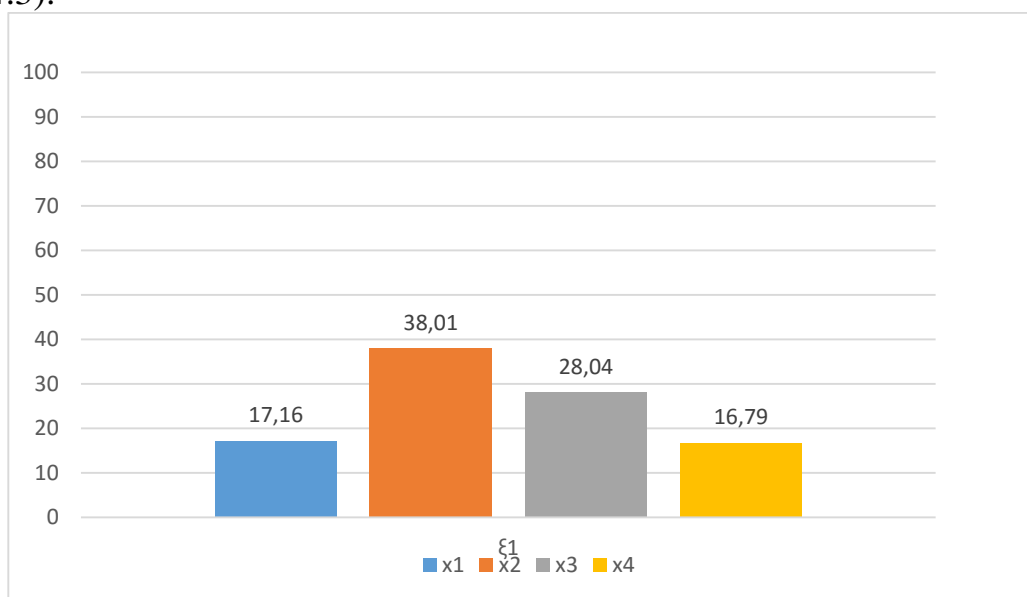


Рисунок 4.3 - Диаграмма значимости варьируемых факторов на удельную поверхность S

Из диаграммы можно сделать вывод, что на изменение показателя удельной поверхности наиболее существенно влияет n_2 – число оборотов ротора вентилятора мельницы (38,01%) и l_{mp} – длина разгонных трубок (28,04%). Число оборотов ротора сепаратора мельницы n_1 и диаметр разгонных трубок мельницы d_{mp} оказывают меньшее, но, все же, существенное влияние - (17,16%) и (16,79%) соответственно.

Это можно объяснить тем, 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 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.

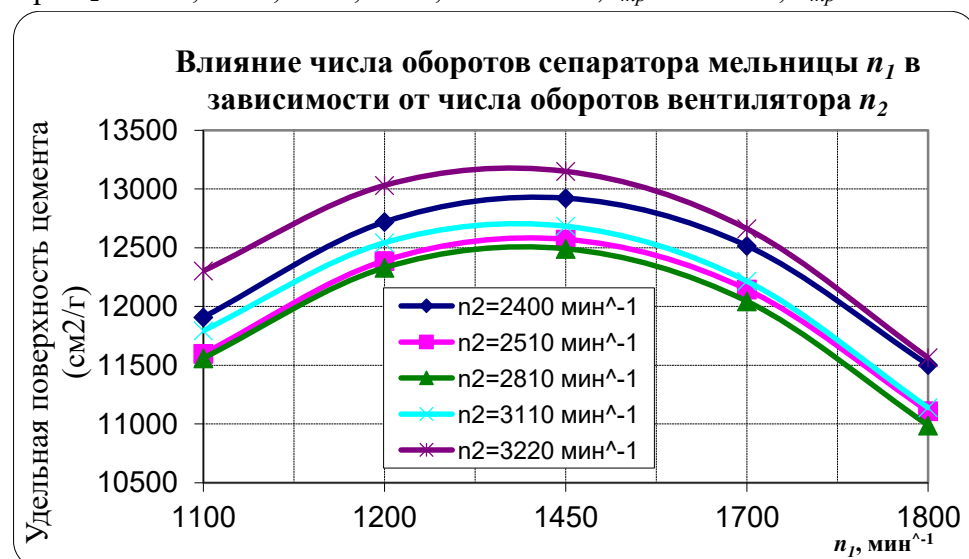
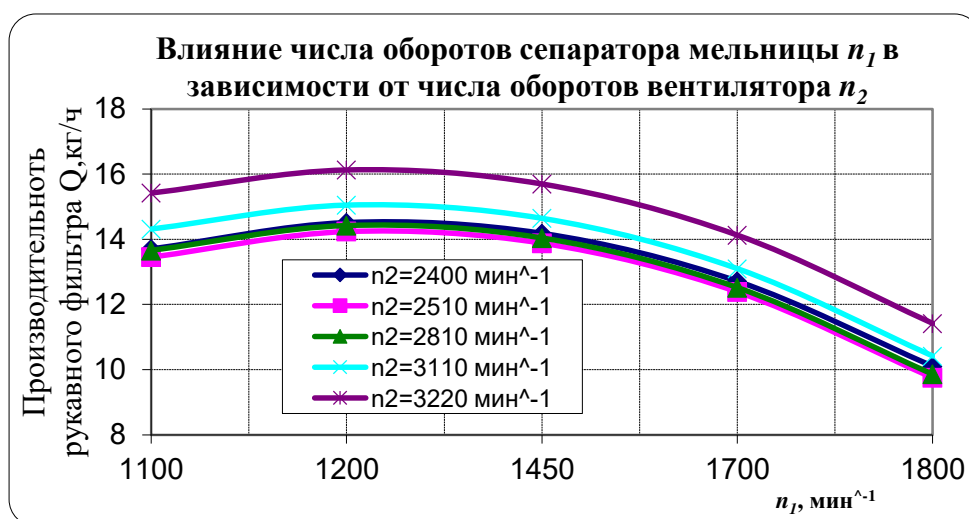
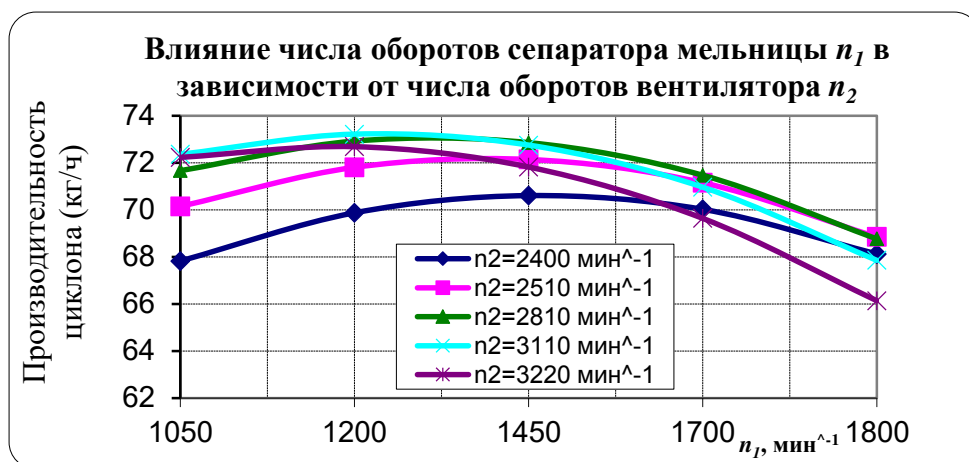
Изучив частные случаи воздействия изменяемых параметров на функции отклика в полученных уравнениях регрессии, для более полного понимания происходящих в мельнице процессов, необходимо проанализировать их воздействие на выходные параметры при различных парных комбинациях, которые представлены ниже в виде графических зависимостей.

4.2. Исследование парного влияния изменяемых факторов на эффективность процесса измельчения в пневмоструйной установке

Проведение эксперимента с тремя функциями отклика и четырьмя независимыми факторами является достаточно сложной задачей статистики. Поэтому, было решено исследовать парные воздействия параметров – числа оборотов сепаратора мельницы n_1 , мин⁻¹; числа оборотов ротора вентилятора мельницы n_2 , мин⁻¹; длины разгонной трубки l_{mp} , мм и диаметров разгонных трубок d_{mp} , мм на следующие функции цели: производительность по микроцементу в циклоне Q_1 , (кг/ч); производительность по микроцементу в рукавном фильтре Q_2 , (кг/ч); удельную поверхность полученного микроцемента S , (см²/г).

На рисунках 4.4.1 - 4.4.3 изображены экспериментальные зависимости Q_1 , Q_2 и S от парного влияния числа оборотов сепаратора мельницы n_1 и числа оборотов ротора вентилятора мельницы при $n_2 = 2400, 2510, 2810, 3110, 3220$ мин⁻¹.

Из приведенных графиков следует, что зависимость Q_1 , Q_2 и S от числа оборотов сепаратора мельницы имеет экстремальный характер. Экстремумы для массовой производительности циклона Q_1 равен 73,2 кг/ч, для массовой производительности рукавного фильтра Q_2 , равен 16,1 кг/ч, для удельной поверхности микроцемента 13200 см²/г и все они достигаются в районе $n_1=1200 - 1450$ мин⁻¹. Наибольшая массовая производительность для циклона Q_1 , а для рукавного фильтра Q_2 достигается в диапазоне числа оборотов вентилятора $n_2=2810 - 3220$ мин⁻¹. Максимальные значения удельной поверхности S наблюдаются при числе оборотов вентилятора $n_2=3220$ мин⁻¹.



Как видно из графиков, массовая производительность, как по циклону, так и по рукавному фильтру имеет тенденцию к повышению в диапазоне оборотов ротора сепаратора до $n_1=1200 - 1450 \text{ мин}^{-1}$. Это можно объяснить тем, что при увеличении числа оборотов ротора сепаратора, увеличиваются центробежные силы, действующие на частицы при классификации материала, из-за чего действие центробежных сил на неизмельченные либо недоизмельченные частицы, по сравнению с измельченными, приводит к преодолению подъемной силы воздуха, прокачиваемого через сепаратор, и недоизмельченный материал уходит обратно в камеру измельчения на домол. А достаточно измельченные частицы выносятся в пылеосадительный тракт, как и в случае с воздействием центробежных сил меньше воздействия подъемной силы потока воздуха движущегося из камеры измельчения к рукавным фильтрам.

В некоторый момент достигается наилучший результат для массовой производительности и получения наибольшей удельной поверхности ($n_1=1200 - 1450 \text{ мин}^{-1}$), после чего наблюдается снижение показателей, возможно, вследствие переизмельчения материала, который сложно уловить в пылеосадительном тракте и он уносится в фильтр.

На рисунках 4.5.1 - 4.5.3 изображены экспериментальные зависимости Q_1 , Q_2 и S от парного влияния числа оборотов ротора вентилятора мельницы n_2 и длины разгонной трубки $l_{mp}= 236, 240, 250, 260, 270 \text{ мм}$.

Из приведенных графиков следует, что зависимость Q_1 , Q_2 и S от числа оборотов вентилятора мельницы имеет экстремальный характер. Экстремумы для массовой производительности циклона равен $73,3 \text{ кг/ч}$, для массовой производительности рукавного фильтра $14,6 \text{ кг/ч}$, а для удельной поверхности $12680 \text{ см}^2/\text{г}$ и все они достигаются в диапазоне $n_2=2810 - 3220 \text{ мин}^{-1}$. Наибольшая массовая производительность для циклона и для рукавного фильтра наблюдается при длине трубки $l_{mp}=240 - 250 \text{ мм}$. Максимальная удельная поверхность достигается при длине трубки $l_{mp}=250 \text{ мм}$.

Это можно объяснить тем, что обороты вентилятора, при которых образуются экстремумы функций массовых производительностей циклона и рукавного

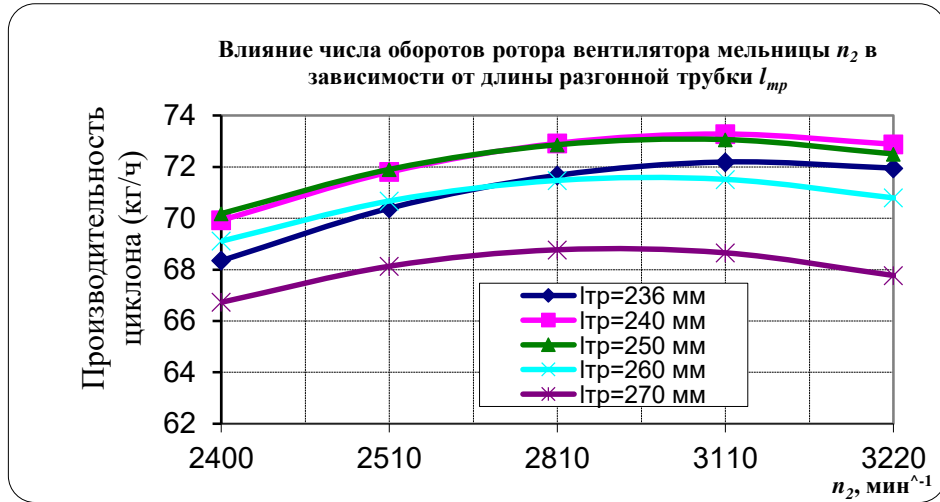


Рисунок 4.5.1 - График зависимости $Q_1=f(n_2)$ при $l_{mp}=236; 240; 250; 260; 270$ мм; $n_1=1450$ мин⁻¹; $d_{mp}=28$ мм

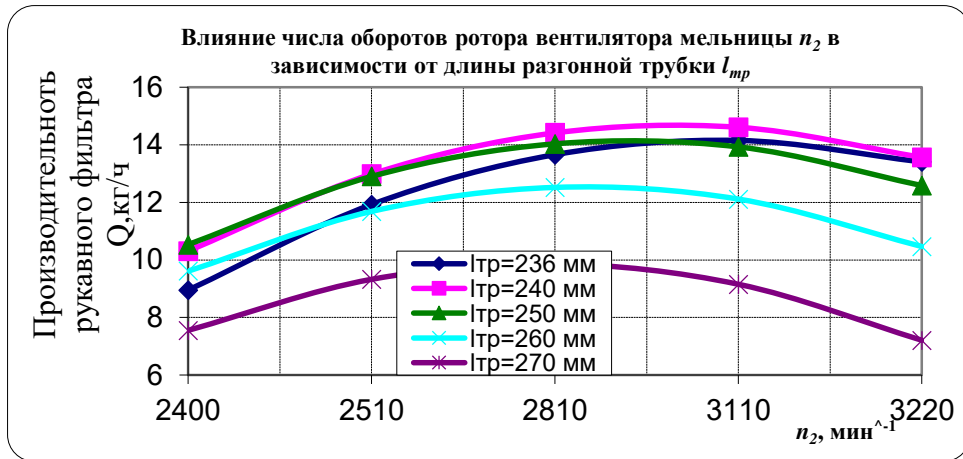


Рисунок 4.5.2 - График зависимости $Q_2=f(n_2)$ при $l_{mp}=236; 240; 250; 260; 270$ мм; $n_1=1450$ мин⁻¹; $d_{mp}=28$ мм

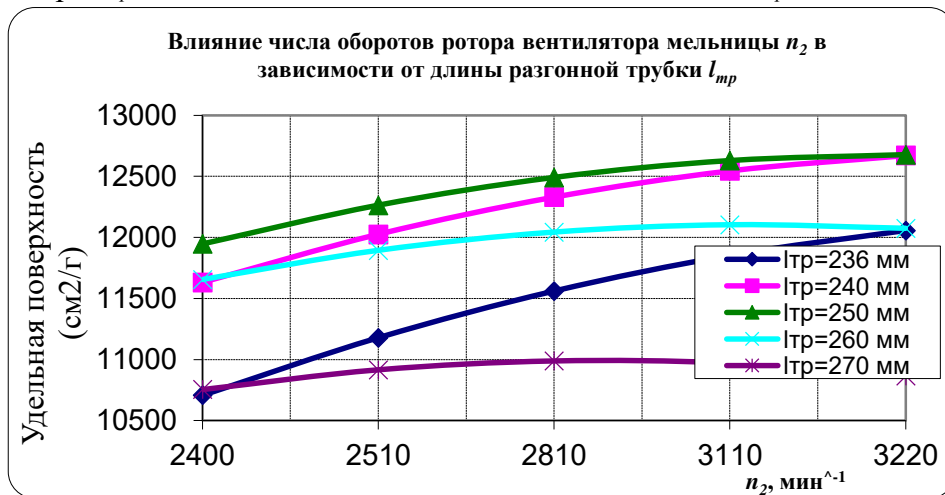


Рисунок 4.5.3 - График зависимости $S=f(n_2)$ при $l_{mp}=236; 240; 250; 260; 270$ мм; $n_1=1450$ мин⁻¹; $d_{mp}=28$ мм

фильтра, совпадают с оптимальными аэродинамическими режимами работы циклона и рукавного фильтра, что позволяет им работать в режиме максимальной производительности.

Оптимальная длина разгонных трубок в диапазоне $l_{mp} = 240 - 250$ мм может объясняться тем, что данные значения соответствуют наиболее интенсивному взаимодействию частиц цемента в камере измельчения. Возможно, уменьшение длины разгонных трубок отрицательно влияет на скорость, при которой взаимодействие частиц цемента менее интенсивно. При увеличении длины разгонных трубок от полученных оптимальных возможно уменьшение пятна соприкосновения частиц, что также снижает общую производительность пневмоструйной мельницы.

На рисунках 4.6.1 - 4.6.3 изображены экспериментальные зависимости Q_1 , Q_2 и S от парного влияния числа оборотов ротора вентилятора мельницы n_2 и диаметра разгонной трубки $d_{mp} = 22, 24, 28, 32, 34$ мм.

Из приведенных графиков можно установить, что зависимость Q_1 , Q_2 и S от числа оборотов ротора вентилятора мельницы имеет экстремальный характер. Экстремумы для всех трех функций отклика лежат в диапазоне $2810 - 3110$ мин⁻¹. Наибольшая массовая производительность циклона Q_1 , рукавного фильтра Q_2 и наибольшая удельная поверхность S достигаются при диаметре трубки в диапазоне $d_{mp} = 24 - 28$ мм.

Полученные оптимальные значения диаметров разгонных трубок, возможно, объясняются тем, что при меньшем диаметре снижается эжектирующая способность сопел и разгонных трубок, т.е. диаметры трубок и сопел имеют недостаточное соотношение для необходимого захвата и разгона материала энергоносителем, в качестве которого выступает воздух. Это приводит к недостаточной передаче энергии от энергоносителя к частицам цемента.

Далее, при увеличении диаметра разгонных трубок, после достижения наилучших результатов разгона частиц материала в разгонных трубках (когда d_{mp} находится в диапазоне от 24 до 28 мм), дальнейшее увеличение диаметра

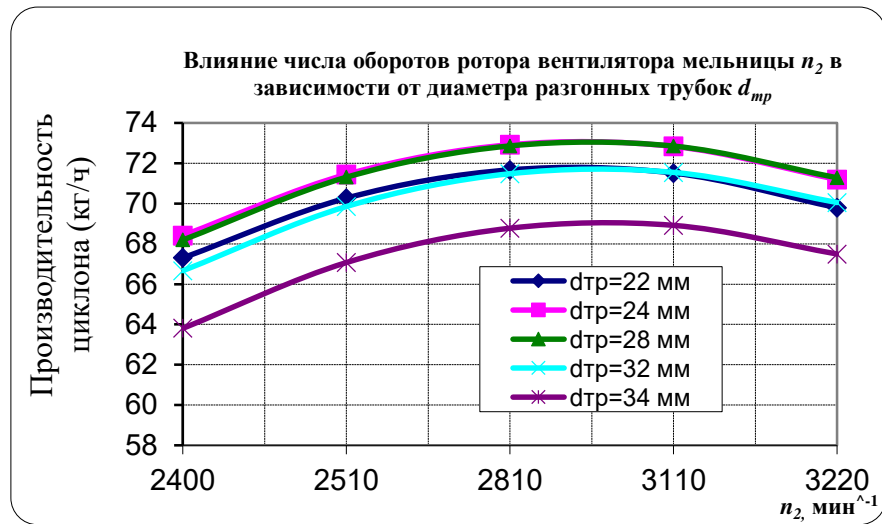


Рисунок 4.6.1 - График зависимости $Q_1 = f(n_2)$ при $d_{mp} = 22; 24; 28; 32; 34$ мм; $n_1 = 1450$ мин⁻¹; $l_{mp} = 250$ мм

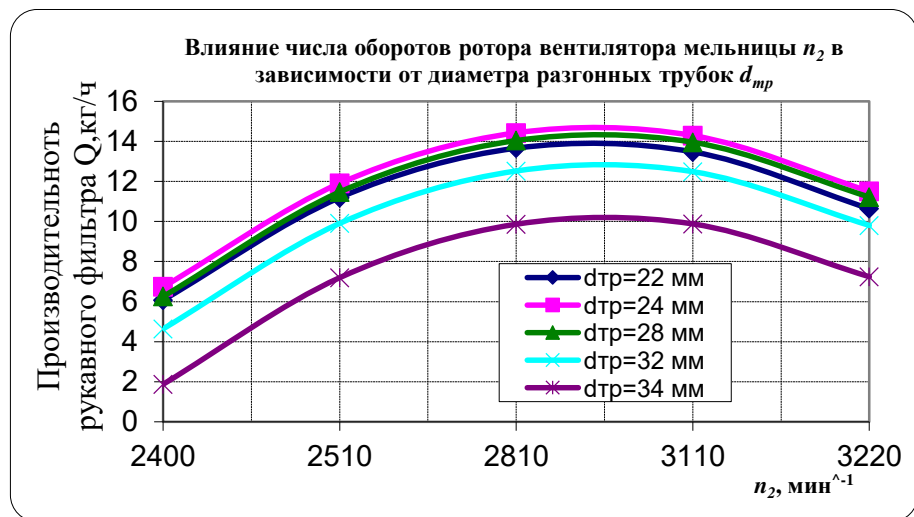


Рисунок 4.6.2 - График зависимости $Q_2 = f(n_2)$ при $d_{mp} = 22; 24; 28; 32; 34$ мм; $n_1 = 1450$ мин⁻¹; $l_{mp} = 250$ мм

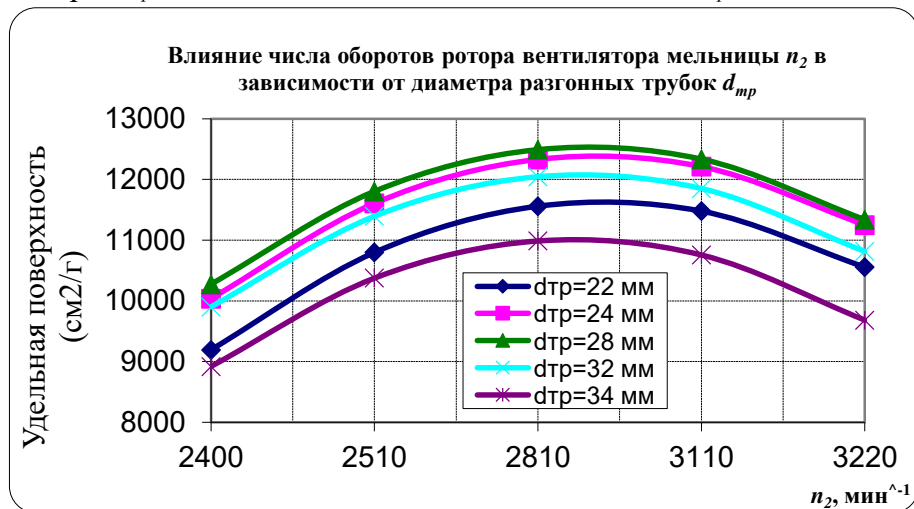


Рисунок 4.6.3 - График зависимости $S = f(n_2)$ при $d_{mp} = 22; 24; 28; 32; 34$ мм; $n_1 = 1450$ мин⁻¹; $l_{mp} = 250$ мм

приводит к снижению скорости смеси в разгонной трубке, а, следовательно, уменьшается кинетическая энергия подхваченного энергоносителем материала, что влияет на интенсивность измельчения материала, и как следствие, снижается общая удельная поверхность конечного продукта.

На рисунках 4.7.1 - 4.7.3 изображены экспериментальные зависимости Q_1 , Q_2 и S от парного влияния диаметра разгонной трубки d_{mp} и числа оборотов ротора сепаратора мельницы $n_l = 1100, 1200, 1450, 1700, 1800 \text{ мин}^{-1}$.

Как видно из графиков, массовая производительность циклона, массовая производительность рукавного фильтра, а также удельная поверхность имеют тенденцию к возрастанию с увеличением диаметра разгонных трубок. Максимальные значения всех трех функций отклика наступают при значении числа оборотов ротора мельницы от 1450 мин^{-1} до 1700 мин^{-1} .

Данные графики можно объяснить тем, что с увеличением диаметров разгонных трубок увеличивается пропускная способность, а, следовательно, и производительность установки в целом. Также с увеличением диаметра трубок увеличивается пятно контакта струй в области их взаимодействия, что способствует интенсификации процесса помола.

Как видно из графиков, массовая производительность, как по циклону, так и по рукавному фильтру имеет тенденцию к повышению в диапазоне оборотов ротора сепаратора до $n_l = 1450 - 1700 \text{ мин}^{-1}$. Это можно объяснить тем, что при увеличении числа оборотов ротора сепаратора, увеличиваются центробежные силы, действующие на частицы при классификации материала, из-за чего действие центробежных сил на не измельченные либо не доизмельченные частицы, по сравнению с измельченными приводит к преодолению подъемной силы воздуха, прокачиваемого через сепаратор, и не доизмельченный материал уходит обратно в камеру измельчения на домол. При этом достаточно измельченные частицы выносятся в пылесадительный тракт, имея небольшое воздействие центробежных сил, по сравнению с подъемной силой потока воздуха движущегося из камеры измельчения в систему пылесадения и очистки.

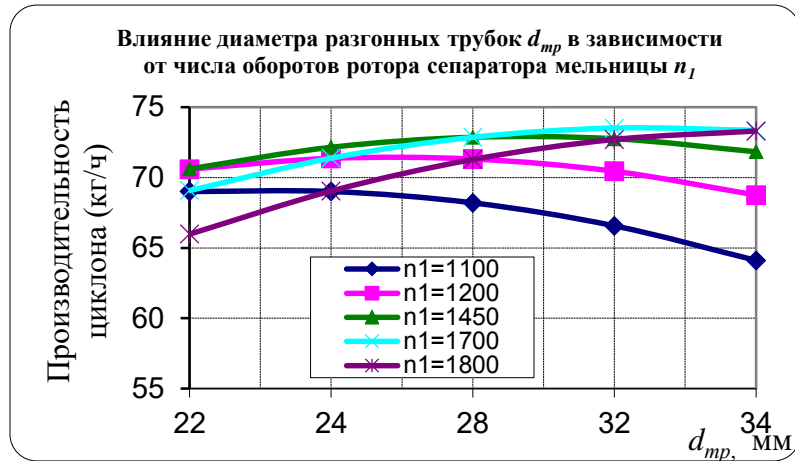


Рисунок 4.7.1 - График зависимости $Q_1, S=f(d_{mp})$, при $n_1 = 1100; 1200; 1450; 1700; 1800$ мин⁻¹; $n_2 = 2810$ мин⁻¹; $l_{mp} = 250$ мм

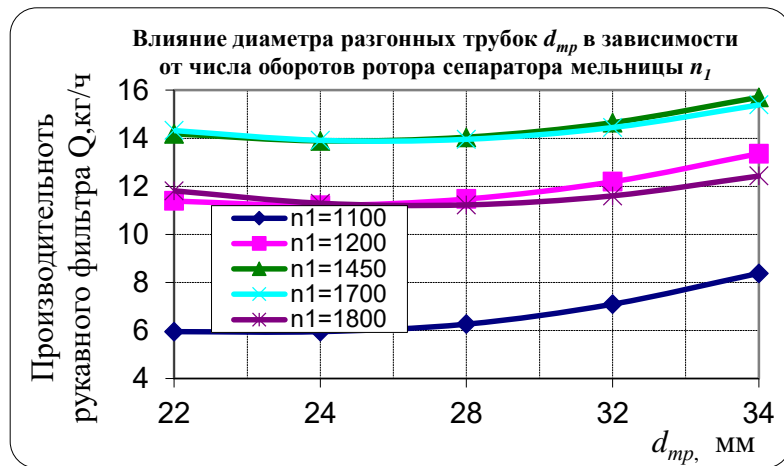


Рисунок 4.7.2 - График зависимости $Q_2=f(d_{mp})$, при $n_1 = 1100; 1200; 1450; 1700; 1800$ мин⁻¹; $n_2 = 2810$ мин⁻¹; $l_{mp} = 250$ мм

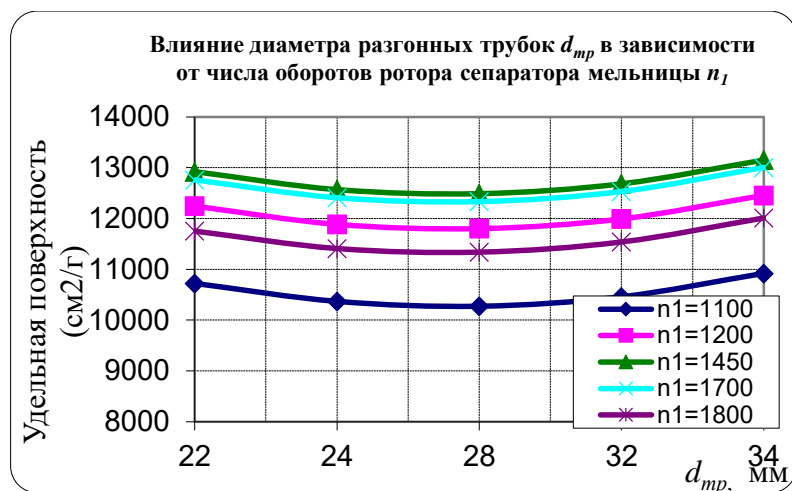


Рисунок 4.7.3 - График зависимости $S=f(d_{mp})$ при $n_1 = 1100; 1200; 1450; 1700; 1800$ мин⁻¹; $n_2 = 2810$ мин⁻¹; $l_{mp} = 250$ мм

При этом необходимо отметить, что в некоторый момент достигается наилучший результат для массовой производительности и получения наибольшей удельной поверхности при $n_l = 1200 - 1450 \text{ мин}^{-1}$, после чего наблюдается снижение вышеописанных показателей. Возможно, это происходит вследствие переизмельчения материала, который сложно уловить в пылесадительном тракте и он выбрасывается в атмосферу вентилятором.

На рисунках 4.8.1 - 4.8.3 изображены экспериментальные зависимости Q_1 , Q_2 и S от парного влияния длины разгонной трубки l_{mp} и диаметра разгонных трубок $d_{mp} = 22, 24, 28, 32, 34 \text{ мм}$.

График зависимости Q_1 от длины разгонных трубок имеет параболический характер. Максимальная производительность по циклону наступает для длины разгонных трубок при максимальном значении $l_{mp} = 260 \text{ мм}$. Максимальная массовая производительность по циклону наступает для диаметра разгонных трубок в диапазоне $d_{mp} = 28 - 32 \text{ мм}$.

График зависимости Q_2 от диаметра разгонных трубок имеет параболический характер. Максимальная производительность по рукавному фильтру наступает для длины разгонных трубок при максимальном значении $l_{mp} = 250 \text{ мм}$. Максимальная производительность по рукавному фильтру наступает для диаметра разгонных трубок в диапазоне $d_{mp} = 28 - 32 \text{ мм}$.

График зависимости S от числа оборотов ротора вентилятора мельницы имеет параболический характер. Максимальная производительность по удельной поверхности наступает для длины разгонных трубок в диапазоне от $l_{mp} = 250 \text{ мм}$ до $l_{mp} = 260 \text{ мм}$. Максимальная производительность по удельной поверхности наступает для диаметра разгонных трубок при $d_{mp} = 28 - 34 \text{ мм}$.

Из графиков видно, что все функции отклика имеют тенденцию к повышению до достижения длины разгонных трубок l_{mp} до 250 - 260 мм, после чего наблюдается снижение во всех рассматриваемых случаях. Это может объясняться тем, что данные значения соответствуют наиболее интенсивному взаимодействию

частиц цемента в камере измельчения. Возможно, уменьшение длины разгонных трубок отрицательно влияет на скорость, при которой взаимодействие частиц

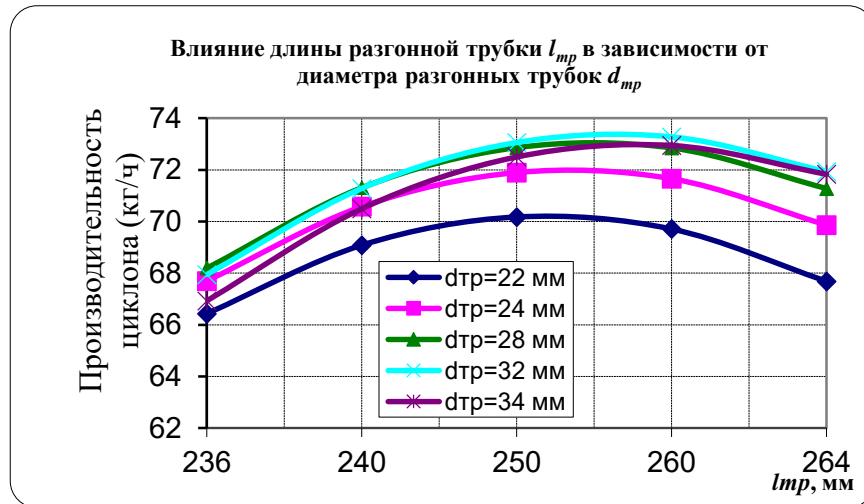


Рисунок 4.8.1 - График зависимости $Q_1=f(l_{mp})$, при $d_{mp}=22; 24; 28; 32; 34$ мм; $n_2=2810$ мин⁻¹; $n_1=1450$ мин⁻¹

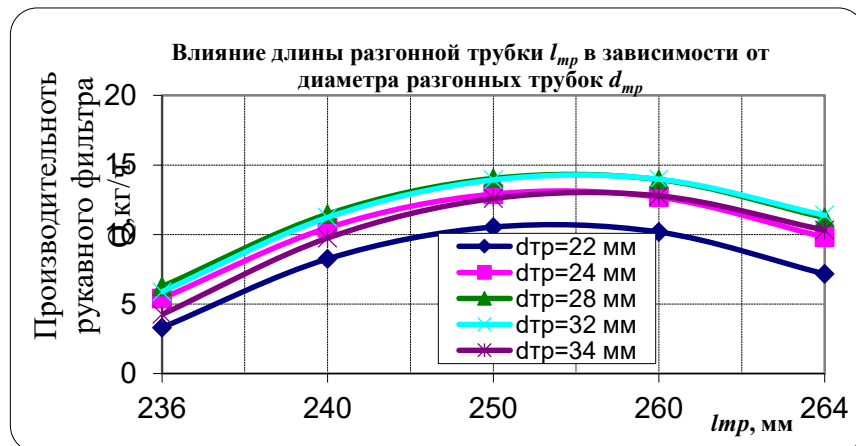


Рисунок 4.8.2 - График зависимости $Q_2=f(l_{mp})$ при $d_{mp}=22; 24; 28; 32; 34$ мм; $n_2=2810$ мин⁻¹; $n_1=1450$ мин⁻¹

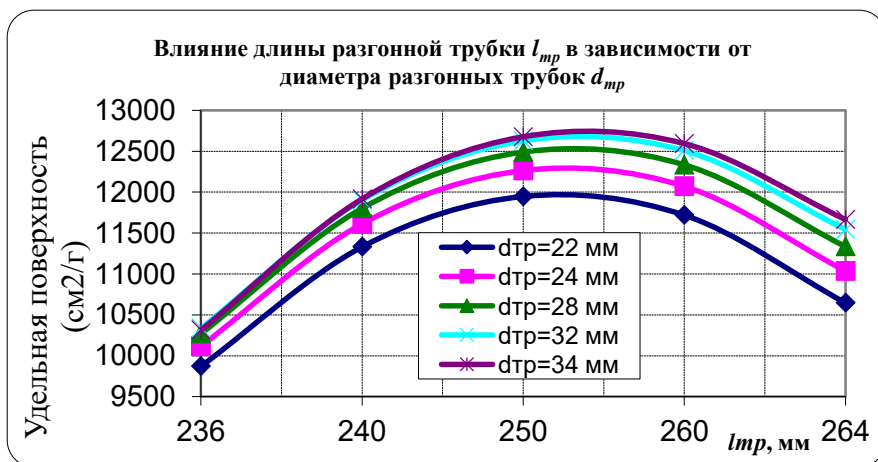


Рисунок 4.8.3 - График зависимости $S=f(l_{mp})$ при $d_{mp}=22; 24; 28; 32; 34$ мм; $n_2=2810$ мин⁻¹; $n_1=1450$ мин⁻¹

цемента наиболее интенсивно. При увеличении длины разгонных трубок от полученных оптимальных, возможно скорости разгона измельчаемых частиц, что также снижает общую производительность пневмоструйной установки.

Максимальная массовая производительность циклона, рукавного фильтра и удельной поверхности наступает при диаметре разгонных трубок $d_{mp} = 28 - 32$ мм. Это может обуславливаться низкой эжектирующей способностью системы сопел и разгонных трубок. Имеется ввиду, что диаметры разгонных трубок и сопел имеют малое соотношение для полноценного захвата и разгона аэросмеси. Далее при увеличении диаметра разгонных трубок выше полученных оптимальных значений, также приводит к снижению скорости смеси в разгонной трубке.

На рисунках 4.9.1 - 4.9.3 изображены экспериментальные зависимости Q_1 , Q_2 и S от парного влияния длины разгонной трубки l_{mp} и числа оборотов ротора сепаратора мельницы $n_l = 1100, 1200, 1450, 1700, 1800$ мин⁻¹.

График зависимости Q_1 от длины разгонных трубок имеет параболический характер. Максимальная производительность по циклону наступает для длины разгонных трубок в диапазоне $l_{mp} = 250 - 260$ мм. Максимальная производительность по циклону наступает для числа оборотов ротора сепаратора мельницы в диапазоне $n_l = 1450 - 1700$ мин⁻¹.

График изменения зависимости Q_2 от длины разгонных трубок имеет близкий к линейному характер. Максимальная производительность по рукавному фильтру наступает для длины разгонных трубок в диапазоне значений $l_{mp} = 260 - 264$ мм. Максимальная производительность по рукавному фильтру наступает для числа оборотов ротора сепаратора мельницы при $n_l = 1700$ мин⁻¹.

График зависимости S от длины разгонных трубок имеет параболический характер. Максимальная производительность по удельной поверхности наступает для длины разгонных трубок при $l_{mp} = 264$ мм. Максимальная производительность по удельной поверхности наступает для числа оборотов ротора сепаратора мельницы при $n_l = 1800$ мин⁻¹.

Увеличение массовой производительности циклона и рукавного фильтра, а также удельной поверхности с увеличением длины разгонных трубок можно

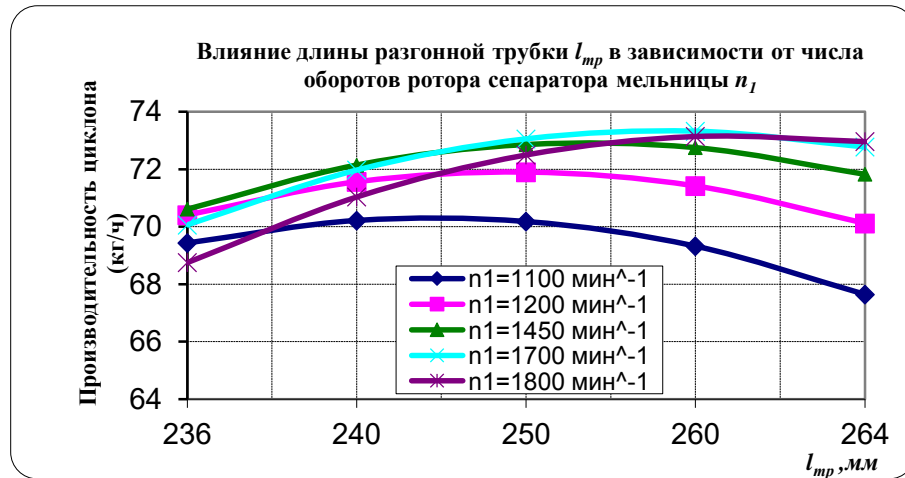


Рисунок 4.9.1 - Графики зависимости $Q_1=f(l_{mp})$ при $n_1=1100; 1200; 1450; 1700; 1800$ мин⁻¹; $n_2=2810$ мин⁻¹; $d_{mp}=28$ мм

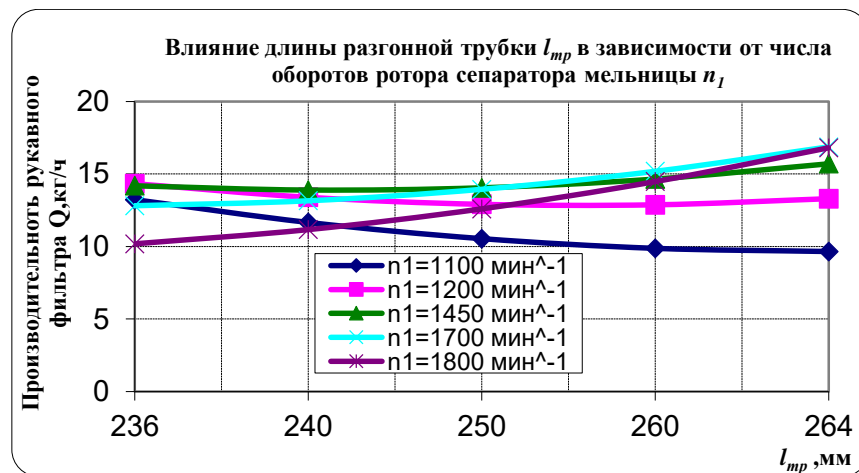


Рисунок 4.9.2 - Графики зависимости $Q_2=f(l_{mp})$ при $n_1=1100; 1200; 1450; 1700; 1800$ мин⁻¹; $n_2=2810$ мин⁻¹; $d_{mp}=28$ мм

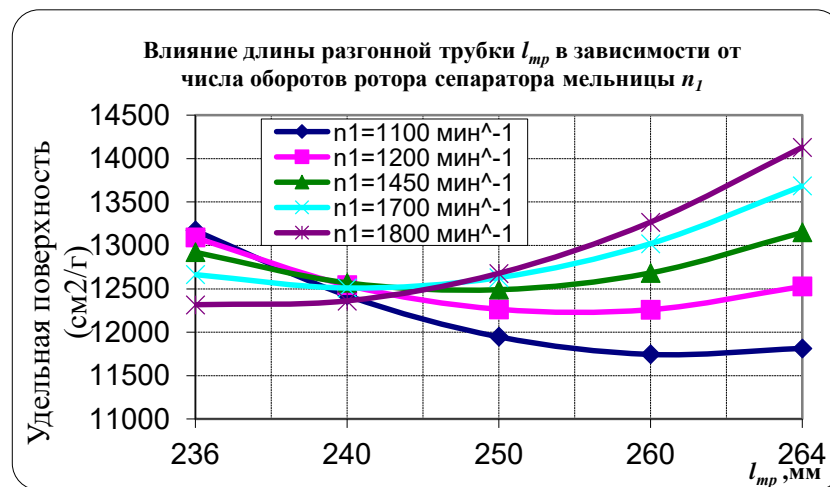


Рисунок 4.9.3 - Графики зависимости $S=f(l_{mp})$ при $n_1=1100; 1200; 1450; 1700; 1800$ мин⁻¹; $n_2=2810$ мин⁻¹; $d_{mp}=28$ мм

объяснить тем, что при увеличении длины разгонных трубок определенной величины увеличивается скорость разгона энергоносителя вместе с частицами цемента, что способствует интенсификации процесса измельчения.

Значения числа оборотов ротора сепаратора $n_1 = 1700 - 1800 \text{ мин}^{-1}$, как предпочтительных для всех функций отклика объясняется тем, что при увеличении числа оборотов ротора увеличивается количество частичек цемента, возвращающихся на домол, тем самым повышается тонкость помола и производительность в тракте пылеосаждения в циклоне и в рукавном фильтре.

На основании полученных и проанализированных экспериментальных данных, принимая во внимание вышесказанное о парном влиянии исследуемых факторов на функции отклика, можно предположить существование наиболее рациональных сочетаний варьируемых параметров, позволяющих, посредством их сочетания, увеличивать производительность цемента в рукавном фильтре, циклоне, и получать максимальную тонкость помола.

Исходя из этого, решалась задача по поиску рациональных значений исследуемых факторов, при которых процесс измельчения цемента в пневмоструйной установке будет протекать наиболее эффективно.

4.3. Определение рациональных параметров процесса измельчения цемента в пневмоструйной установке

Исходными данными для решения поставленной задачи являются уравнения регрессии $Q_1 = f(n_1; n_2; l_{mp}; d_{mp})$, $Q_2 = f(n_1; n_2; l_{mp}; d_{mp})$, , $S = f(n_1; n_2; l_{mp}; d_{mp})$, выступающие как функции цели, зависящие от четырех (x_1, x_2, x_3, x_4) переменных: числа оборотов ротора сепаратора мельницы $n_1, \text{ мин}^{-1}$; числа оборотов ротора вентилятора мельницы $n_2, \text{ мин}^{-1}$; длины разгонных трубок l_{mp} ; диаметра разгонных трубок d_{mp} , мм.

Все эти три функции цели необходимо рассматривать совместно, т.к. они дают полную информацию о технологичности получения продукта и его качественных показателях.

Поиск экстремумов осуществлялся исходя из следующих требований: значения массовой производительности циклона и рукавного фильтра Q_1 и Q_2 соответственно, а также удельной поверхности S должны стремиться к максимуму.

$$Q_1 \rightarrow \max, Q_2 \rightarrow \max, S \rightarrow \max \quad (4.11)$$

Зачастую, если рассматривается многокритериальная задача, то критерии являются противоречивыми. В данном случае критерии совпадают в стремлении к максимуму. Задача оптимизации – найти тот режим работы установки, который удовлетворял бы наиболее эффективным условиям её эксплуатации.

Для решения задачи оптимизации пользуемся методом покоординатной оптимизации.

Исходными данными этой задачи являются уравнения регрессии:

$$\begin{aligned} Q_1 &= f(x_1, x_2, x_3, x_4), \\ Q_2 &= f(x_1, x_2, x_3, x_4), \\ S &= f(x_1, x_2, x_3, x_4), \end{aligned} \quad (4.12)$$

выступающие как функции цели, зависящие от четырех переменных: x_1, x_2, x_3, x_4 .

Суть метода сводится к сведению поиска экстремума функции n переменных к одномерному поиску, т.е. поиску функции с одной переменной.

На рисунках 4.12 – 4.15 представлены комплексные графики функций отклика: производительностей и удельной поверхности $Q_1, Q_2, S = f(n_1; n_2; l_{mp}; d_{mp})$.

Для анализа многокритериальной задачи оптимизации функций n -переменных воспользовались «методом лица, принимающего решение». Под термином оптимизация подразумевается процесс максимизации выгодных характеристик.

Хотя конечной целью оптимизации является поиск наилучшего или оптимального решения, обычно приходится довольствоваться улучшением известных решений.

Рисунок 4.12 показывает изменение производительностей циклона и рукавного фильтра соответственно Q_1 и Q_2 , удельной поверхности S от числа оборотов ротора вентилятора мельницы при остальных фиксированных параметрах.

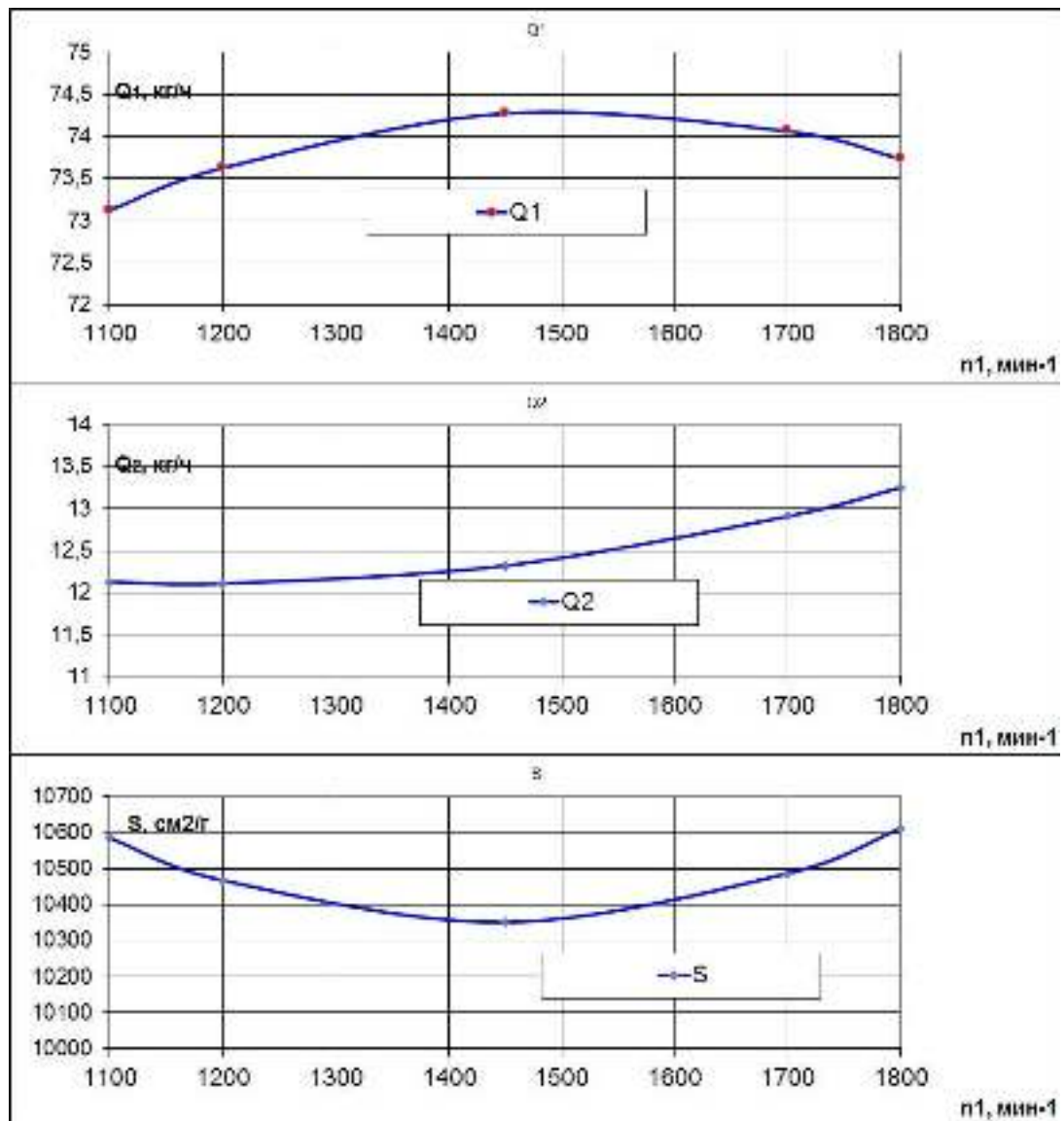


Рисунок 4.12 - График зависимости рациональных значений функций отклика от числа оборотов ротора вентилятора мельницы n_1 при $n_2=2810 \text{ мин}^{-1}$, $l_{mp}=250 \text{ мм}$, $d_{mp}=28 \text{ мм}$

Как видно из графиков, с увеличением числа оборотов ротора мельницы n_2 от 2400 мин^{-1} до 3220 мин^{-1} при остальных фиксированных параметрах происходит сначала увеличение всех показателей функций отклика, а затем уменьшение

таким образом, что максимальная массовая производительность циклона наблюдается в районе $n_2=2510 - 2810 \text{ мин}^{-1}$ и составляет $74,3 \text{ кг/ч}$, а минимальная - в районе $n_2=3220 \text{ мин}^{-1}$ и составляет 72 кг/ч . Максимальная массовая производительность рукавного фильтра наблюдается в районе $n_2= 2510-2810 \text{ мин}^{-1}$ и составляет $12,6 \text{ кг/ч}$, а минимальная в районе $n_2= 3220 \text{ мин}^{-1}$ и составляет $9,8 \text{ кг/ч}$. Максимальная удельная поверхность наблюдается в районе $n_2= 2510 - 2810 \text{ мин}^{-1}$ и составляет $10550 \text{ см}^2/\text{г}$, а минимальная в районе $n_2= 3220 \text{ мин}^{-1}$ и составляет $9000 \text{ см}^2/\text{г}$. Таким образом рациональной областью для числа оборотов ротора вентилятора является $2510 - 2810 \text{ мин}^{-1}$ при следующих значениях функций отклика $Q_1= 74,3 \text{ кг/ч}$, $Q_2= 12,6 \text{ кг/ч}$, $S=10550 \text{ см}^2/\text{г}$.

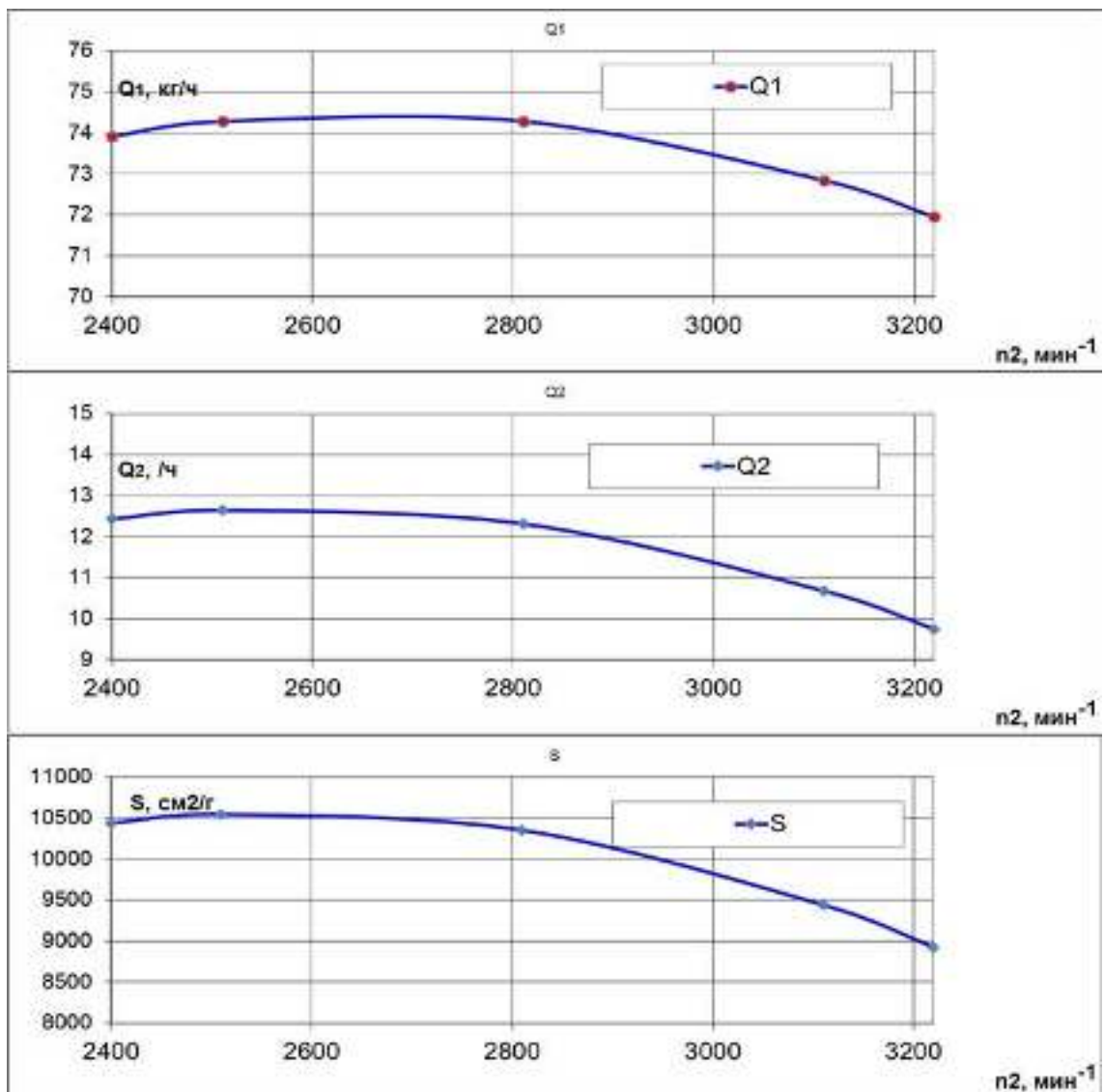


Рисунок 4.13 - График зависимости рациональных значений функций отклика от числа оборотов ротора вентилятора мельницы n_2 при $n_2=2810 \text{ мин}^{-1}$, $l_{mp}=250 \text{ мм}$, $d_{mp}=28 \text{ мм}$

Рисунок 4.13 показывает изменение производительностей циклона и рукавного фильтра соответственно Q_1 и Q_2 , удельной поверхности S от числа оборотов сепаратора мельницы при остальных фиксированных параметрах.

Из графиков видно, что максимальная массовая производительность циклона наблюдается при числе оборотов ротора сепаратора в районе $n_1=1450 - 1700 \text{ мин}^{-1}$ и составляет 74,3 кг/ч, а минимальная наблюдается в районе $n_1=1100 \text{ мин}^{-1}$.

Максимальная массовая производительность рукавного фильтра наблюдается при числе оборотов ротора сепаратора $n_1=1800 \text{ мин}^{-1}$ и составляет 13,2 кг/ч, а минимальная наблюдается в районе $n_1=1100 \text{ мин}^{-1}$ и составляет 12,1 кг/ч.

Максимальные значения удельной поверхности наблюдаются при числе оборотов ротора сепаратора $n_1=1800 \text{ мин}^{-1}$ и составляет 10600 см²/г, а минимальные наблюдаются в районе $n_1=1450 \text{ мин}^{-1}$. Таким образом, рациональным значением для числа оборотов ротора сепаратора является 1700 мин⁻¹ при следующих значениях функций отклика $Q_1= 74,1 \text{ кг/ч}$, $Q_2= 12,9 \text{ кг/ч}$, $S=10500 \text{ см}^2/\text{г}$.

Рисунок 4.14 показывает изменение производительностей циклона и рукавного фильтра соответственно Q_1 и Q_2 , удельной поверхности S от длины разгонной трубки при остальных фиксированных параметрах.

Из графиков видно, что максимальная массовая производительность циклона наблюдается в районе $l_{mp}=250 - 260 \text{ мм}$ и составляет 74,6 кг/ч, а минимальная в районе $l_{mp}=236 \text{ мм}$ и составляет 72,5 кг/ч.

Максимальная массовая производительность рукавного фильтра наблюдается в районе $l_{mp}=250 - 260 \text{ мм}$ и составляет 12,4 кг/ч, а минимальная наблюдается в районе $l_{mp}=236 \text{ мм}$ и составляет 10,4 кг/ч.

Максимальная удельная поверхность наблюдается в районе $l_{mp}=260 - 264 \text{ мм}$ и составляет 10480 см²/г, а минимальная в районе $l_{mp}=236 \text{ мм}$ и составляет 10000 см²/г.

Рациональной областью для длины разгонных трубок является 250 - 260 мм при следующих значений функций отклика $Q_1= 74,6 \text{ кг/ч}$, $Q_2= 12,4 \text{ кг/ч}$, $S=10450 \text{ см}^2/\text{г}$.

Рисунок 4.15 показывает изменение производительностей циклона и рукавного фильтра соответственно Q_1 и Q_2 , удельной поверхности S от диаметра разгонной трубки при остальных фиксированных параметрах.

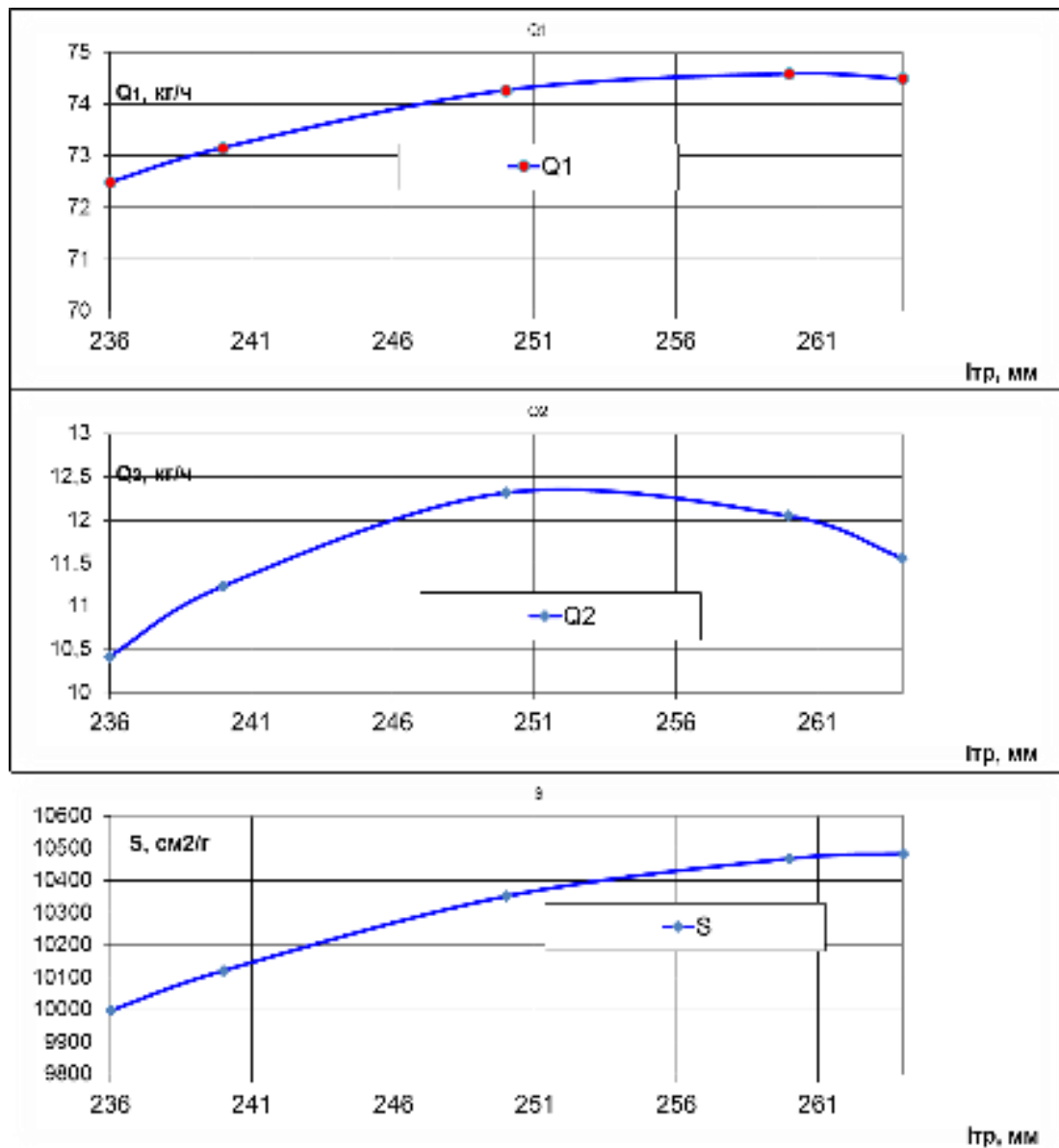


Рисунок 4.14 - График зависимости рациональных значений функций отклика от длины разгонной трубки l_{mp} при $n_2=3110 \text{ мин}^{-1}$, $n_1=1700 \text{ мин}^{-1}$, $d_{mp}=24 \text{ мм}$

Максимальная массовая производительность циклона наблюдается в диапазоне $d_{mp}=28 - 32 \text{ мм}$ и составляет $74,4 \text{ кг/ч}$, а минимальная в районе $d_{mp}=22 \text{ мм}$ и составляет $71,6 \text{ кг/ч}$. Максимальная массовая производительность рукавного фильтра наблюдается в районе $d_{mp}=28 - 32 \text{ мм}$ и составляет $12,3 \text{ кг/ч}$, а минимальная в районе $d_{mp}=22 \text{ мм}$ и составляет $7,8 \text{ кг/ч}$. Максимальная удельная поверхность наблюдается в районе $d_{mp}=28-32$ и составляет $10400 \text{ см}^2/\text{г}$.

Рациональной областью для диаметра разгонных трубок является 28 - 32 мм при следующих значениях функций отклика: $Q_1=74,4$ кг/ч, $Q_2=12,3$ кг/ч, $S=10400$ см²/г.

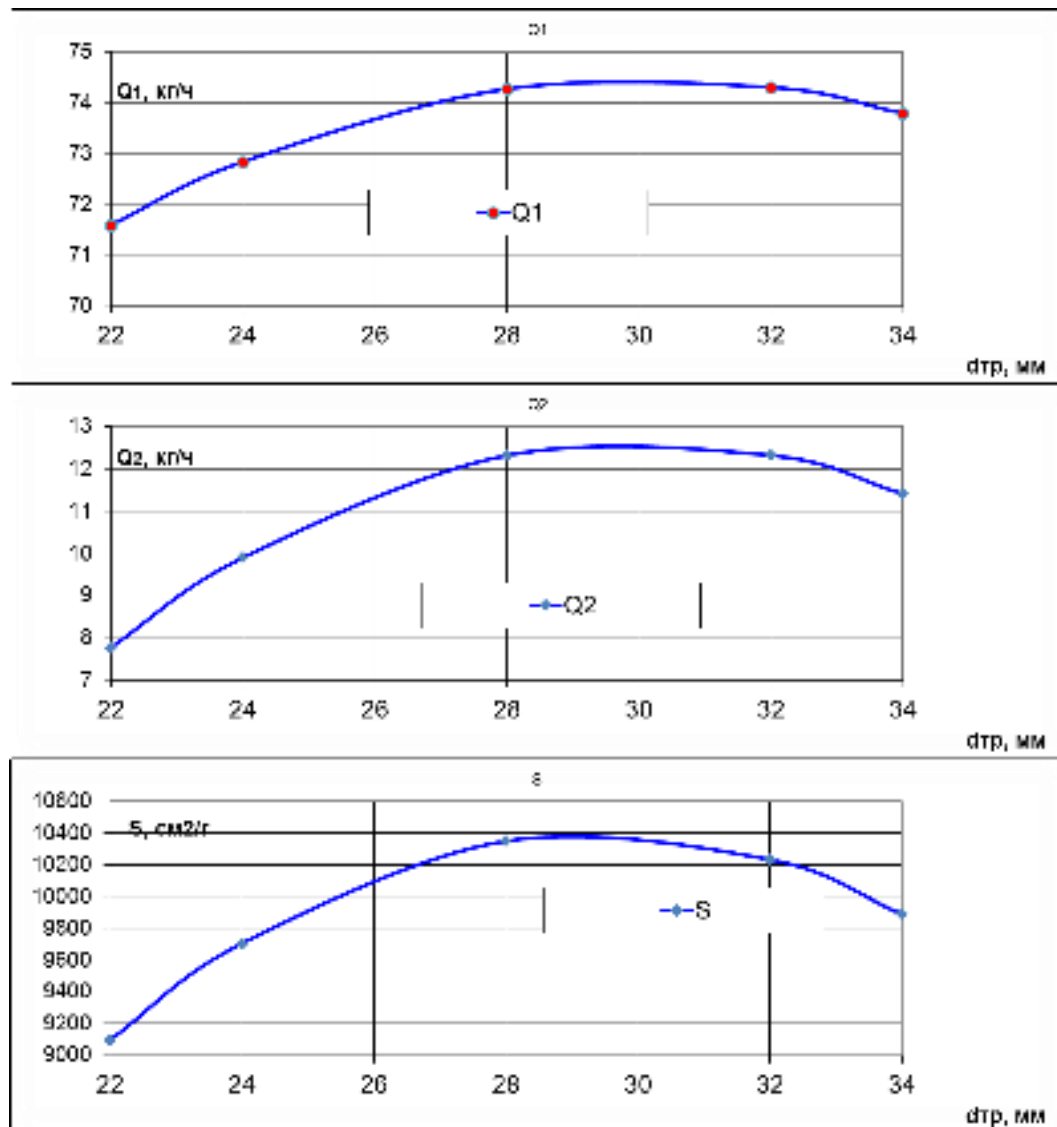


Рисунок 4.15 - График зависимости рациональных значений функций отклика от диаметра разгонной трубки $d_{тр}$ при $n_1=1700$ мин⁻¹, $n_2=3110$ мин⁻¹, $l_{тр}=240$ мм

Кроме найденных рациональных значений, графики, представленные на рисунок 4.12 - 4.15, имеют чисто практический интерес. Используя их можно спрогнозировать характеристики конечного продукта. Таким образом, мы можем прогнозировать конструктивно-технологические параметры пневмоструйной установки для измельчения микроцемента с заранее прогнозируемым результатом.

4.4. Выводы.

1. При проведении поисковых экспериментов выявлены параметры оптимизации Q_1 , Q_2 и S , а также основные факторы, влияющие на режим и технические показатели работы установки и уровни варьирования факторов, при которых достигается наибольшая эффективность процесса помола.

2. В ходе проведения плана многофакторного эксперимента получены уравнения регрессии $(Q_1, Q_2, S)=f(x_1, x_2, x_3, x_4)$, которые позволили определить влияние не только каждого из факторов, но и эффекты их взаимодействия на формирование параметров оптимизации.

3. С помощью многофакторных экспериментов было выявлено наиболее детальное влияния каждого из факторов на характер и величину параметров оптимизации.

4. Полученные уравнения регрессии позволили осуществить выбор рациональных конструктивных параметров и технологических режимов работы установки для тонкого измельчения цемента в условиях, когда выполняется требование $(Q_1, Q_2, S) \rightarrow \max$.

5. По результатам экспериментов, а также на основании оптимизации конструкции и режимов работы установки выявлено, что наибольшая эффективность процесса помола цемента достигается при следующих значениях факторов: частота вращения ротора сепаратора мельницы – 1600 – 1800 мин⁻¹; частота вращения оборотов ротора вентилятора мельницы – 2510–2810 мин⁻¹; длина разгонной трубки – 250 – 260 мм; диаметр разгонных трубок – 28–32 мм.

5. ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ

5.1 Описание промышленного комплекса

В ходе выполнения диссертационной работы, была разработана конструкторская документация на опытно-промышленный образец установки для тонкого измельчения цемента. Установка изготовлена и испытана в промышленных условиях ЗАО «Петрохим» (г. Белгород). В установке были реализованы технические решения в соответствии с патентом РФ №174065, рассчитанные по предложенной в данной работе методике. Работу установки для тонкого измельчения обеспечивали: центробежный сепаратор; циклон СЦН-40-300; рукавный фильтр ФРКИ-10; вентилятор СКАТ/2-801; вибрационный питатель; компрессор с ресивером (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 - Промышленный вариант установки для пневмоструйного получения микроцемента

1 – вибрационный питатель; 2 – камера измельчения; 3 – сепаратор.

Установка имеет следующие технические характеристики.

1. Производительность по цементу с удельной поверхностью 10000 см ² /г, кг	– до 100
2. Размер частиц исходного материала, мкм	– до 100
3. Рабочее давление сжатого воздуха, МПа	– 0,6÷0,8
4. Тип классификатора	центробежный
5. Привод классификатора:	
тип электродвигателя	– асинхронный
мощность, кВт	– 1,5
частота вращения вала, мин ⁻¹	– 2810
клиноременная передача	$i=1:1$
число ремней на одну передачу, шт	– 1
6. Габаритные размеры:	
длина, мм	–
ширина, мм	–
высота, мм	–
7. Масса, кг	– не более 100

5.2 Размещение мельницы и вспомогательного оборудования

Размещение пневмоструйной мельницы, а также вспомогательного оборудования возможно только в закрытом, сухом и теплом производственном помещении с температурой не менее +18⁰ С. Расположение технологического комплекса желательно вблизи от склада с материалом, предназначенного для помола. Так как мельница работает на сжатом воздухе, место её расположения выбирают также с учетом разводки магистрали сжатого воздуха. Поступление сжатого воздуха в магистраль возможно только после очистки и осушения. Пульт управления комплексом должен располагаться рядом или на минимально

возможном расстоянии в зоне визуального контроля всего оборудования. Расположение пылеосадительного блока и отсасывающего вентилятора допускается в стороне от струйной мельницы, с учетом удобства расстановки оборудования в цехе и допустимых длин и конфигураций соединительных газоходов.

5.3 Пуск комплекса в работу и остановка комплекса

Пуск мельницы и вспомогательного оборудования осуществляется в следующем порядке:

1. Осуществляется проверка на герметичность (закрытие) бункеров циклонов и рукавного фильтра.

2. Осуществляется загрузка измельчаемого материала в бункер вибрационного питателя.

3. Включается в работу отсасывающий вентилятор, который создает разрежение по всему тракту комплекса.

4. Включается классификатор мельницы.

5. Открытием вентилей осуществляется подача сжатого воздуха в нижний и верхний коллекторы подачи сжатого воздуха.

6. Включается в работу вибрационный питатель, начинается подача материала в загрузочный патрубок. При этом следует следить за отсутствием пыления в районе загрузочного патрубка. В случае возникновения пыления следует увеличить число оборотов вентилятора с помощью частотного регулятора или слегка прикрыть заслонку на отсасывающем газоходе перед вентилятором.

7. Открывается магистраль сжатого воздуха для продувки рукавного фильтра. Проверяется время срабатывания клапанов продувки, в случае необходимости переустанавливается время их срабатывания.

8. Оператор помола постоянно находится в помещении у пульта управления.

Отключается комплекс в следующем порядке:

1. Отключается вибрационный питатель, прекращается подача материала в загрузочный патрубок. Мельница должна проработать без подачи материала как минимум 15 минут или до появления характерного гула от сталкивающихся пустых струй сжатого воздуха.
2. Закрытием вентилей прекращается подача сжатого воздуха в нижний и верхний коллекторы подачи сжатого воздуха.
3. Отключается классификатор мельницы.
4. Выключается отсасывающий вентилятор.
5. Перекрывается магистраль сжатого воздуха для продувки рукавного фильтра.
6. Осуществляется выгрузка готового продукта из бункеров циклонов и бункера рукавного фильтра.
7. Осуществляется уборка оборудования и помещения.

5.4. Расчет экономической эффективности

Расчет экономической эффективности проводился при условии внедрения пневмоструйной установки на предприятии с «нуля». При расчете не бралась в учет стоимость аренды помещения, а также амортизационные затраты при эксплуатации здания [101].

В качестве сырья использовался сухоложский высокосульфатостойкий тампонажный Портландцемент по Спецификации API 10A, класс G тип HSR (ПЦТ I-G-CC-1 ГОСТ 1581-96) розничной стоимостью 6300 руб/т. В качестве конечного продукта рассматривалась цементная смесь ЦС БТРОУ «МИКРО» розничной стоимостью 114000 руб/т. Годовая производительность одной установки принималась 100 т/год из расчета дневной производительности 400 кг.

Зная стоимость единицы продукции и количество произведенного цемента за год можно рассчитать годовую выручку, которая равна 11 400 000 рублей в год. Переменные затраты на материалы (стоимость сырья) равна 630 000 рублей в год.

Себестоимость установки с учетом пылеосадительного тракта (циклон, рукавный фильтр, вентилятор) 1 500 000 рублей. Амортизационные затраты на установку за год составят 300 000 рублей. Работы по монтажу и пусконаладка 300 000 руб. Годовые расходы на маркетинг приняли 360 000 рублей. Зарплату рабочему приняли 35 000 рублей, итого в год 420 000 рублей.

Также рассчитывались затраты на электроэнергию ротора сепаратора – 1,5 кВт, вытяжного вентилятора – 5,5 кВт и компрессора – 40 кВт. Тариф был принят на уровне 6,57 рублей за кВт. Итого за год сумма на затраты электроэнергии составила 654 634 рублей.

На основании имеющихся данных составим таблицу бюджета на год:

Таблица 5.1 Предполагаемый бюджет при внедрении установки

Наименования расхода/прибыли	Бюджет
Объем производства порошка, т:	100
Переменные затраты на материалы, руб:	630 000
Переменные затраты на оплату труда, руб:	800 000
Постоянные накладные расходы, руб:	1 314 634
Полные затраты, руб:	4 244 634
Выручка, руб:	11 400 000
Прибыль, руб:	7 155 366

Таким образом, экономический эффект от внедрения пневмоструйной мельницы составит 7 155 тыс. руб.

Выводы

1. Изготовлен опытно-промышленный образец противоточной пневмоструйной установки для тонкого измельчения цемента. Проведены его промышленные испытания, которые показали эффективность использования такого типа оборудования применительно высокодисперсному производству цемента. Реальная производительность мельницы составила 100 кг/ч по готовому продукту с удельной поверхностью свыше 11000 см²/г.

2. Произведено описание промышленного комплекса, размещения мельницы и вспомогательного оборудования, а также описан пуск комплекса в работу и его остановка.

3. Результаты испытаний по тонкому измельчению цемента на предлагаемой установке одобрены на предприятии ЗАО «Петрохим». Предполагаемый экономический эффект от внедрения оборудования составит 7 155 тыс. руб.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Был проведен анализ направлений развития и совершенствования техники, а также технологии измельчения, в ходе которого было выявлено, что наиболее перспективными аппаратами, являются мельницы струйной энергии.

2. Предложена новая патентная 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⁻¹; числа оборотов ротора вентилятора n_2 , мин⁻¹; длин разгонных трубок l_{mp} , мм; диаметра 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 (см²/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 требование (Q_1 , Q_2 , S) стремятся к *max*. Таковыми установлены $n_1 = 1700$ мин⁻¹; $n_2 = 2510-2810$ мин⁻¹; $l_T = 250-260$ мм; $d_m = 28-32$ 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».

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию, как в промышленности строительных материалов, так и других отраслях при решении задач повышения эффективности производства тонкодисперсных порошков.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Планируется совершенствовать процесс производства тонкодисперсных порошков микроцемента за счет оптимизации совместной работы помольного блока и

воздушного центробежного сепаратора, а также пылеосадительного тракта и тракта пылеочистки, обеспечивающих эффективную работу пневмоструйной мельницы предложенной конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Официальный сайт компании «Globecore» : [сайт]. URL: <https://globecore.ru/>
2. Официальный сайт компании «Химеко-ганг»: [сайт]. URL: <http://www.himeko.ru/>
3. Официальный сайт ЗАО «Петрохим»: [сайт]. URL: <http://petrohim.ru/>
4. *Народов, В.В.* Тампонажные цементно-гипсовые материалы с добавлением горелых пород и цеолитов для строительных работ в условиях вечной мерзлоты: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.05 / Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун.-т. – Новосибирск, 2009. – 18 с.
5. Сайт научно-практического журнала «Время колтюбинга. Время ГРП»: [сайт] URL: <http://www.cttimes.org/>
6. *Богданов, В.С.* Барабанные мельницы с поперечно-продольным движением мелющих тел: Автореф. дис. ... док. техн. наук: 05.02.16 / БТИСМ. – Белгород., 1986. – 48 с.
7. *Шарапов, Р.Р.* Шаровые мельницы замкнутого цикла измельчения с повышенной продольной скоростью материала: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / БТИСМ. – Белгород, 1996. – 22 с.
8. *Летин, Л.А.* Среднеходные и тихоходные мельницы / Л.А. Летин, К.Ф. Роддатис. – М.: Энергоиздат, 1981. – 359 с.
9. *Schneider, L.T.* Energy saving clinker grinding systems. Part 1. // World Cement. – 1985. – Vol. 2. – P. 20-27.
10. *Schneider, L.T.* Energy saving clinker grinding systems. Part 2. // World Cement. – 1985. – Vol. 3. – P. 80-87.
11. *Sakata, T., Matsymto, K.* One-kiln-one-mill system at Osaka Cement // Zement-Kalk-Gips. - 1983. - № 2. – P.75-80.
12. *Reusch, H.* Energiespared zerrleinern in Gutbett-Walzenmuh-len // Kugellagen-Z.-S. - № 233. – P. 20-29.

13. *Dekr, J.* Vergleich Walzenschusseimuhlenkugelmuhlen fur du Mahlung von Zement rohmaterial // Zement-Kalk-Gips. – 1980. № 3. – P. 219-222.
14. *Mathieu, E.U.* Erste versucherkebnisse zur Vermahlung von Zementklinker aut Pendelmuhlen // Zement-Kalk-Gips. - 1983. - № 2. - P. 62-64.
15. *Демин, А.В.* Закономерности процесса пресс-валкового измельчения портландцементного клинкера / А.В. Демин, А.О. Лебедев // Совершенствование техники и технологии измельчения материалов: Сб. науч. Тр. – Белгород: Изд-во БТИСМ, 1989. – С. 60-63.
16. *Романович, А.А.* Энергосберегающие агрегаты для измельчения материалов цементного производства с анизотропной структурой: Автореф. дис. ... док. техн. наук: 05.02.13 /БГТУ им. В.Г. Шухова. –Белгород., 2014. – 42 с.
17. *Ярыгин, А.А.* Пневмоструйная мельница с эффектом самофутеровки помольной камеры: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 /БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород., 2007. – 23 с.
18. *Семикопенко, И.А.* Дезинтеграторы с эксцентричным расположением рядов рабочих элементов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 /БТАСМ. – Белгород., 1998. – 20 с.
19. Дезинтеграторы фирмы Condux (Германия) // Экспресс-информация. Сер.4. Машины и оборудование для промышленности строительных материалов. – М.: ЦНИИТЭстроймаш. – 1988. – Вып. 2. – С. 10-11.
20. *Данилов, Р.Г.* Механизм тонкого измельчения в роторных мельницах с зубчатоподобным зацеплением / Р. Г. Данилов // Строительные и дорожные машины. – 1997. – № 12. – 208 с.
21. *Strasser, S.* Современное состояние технологии помола от фирмы KHD Humboldt Wedag / S. Strasser // Цемент и его применение, 2002. - №1. – С. 27-30.
22. *Осокин, В.П.* Интенсификация процесса измельчения в вибромельнице / В.П, Осокин, С.Г. Ушаков, А.А. Пospelов // Совершенствование техники и технологии измельчения материалов: Сб. науч. Тр. – Белгород: Изд-во БТИСМ, 1989. – С. 187-194.

23. Сайт компании ООО «ЭКОСТРОЙМАТЕРИАЛЫ»: [сайт]. URL: <http://www.penostroy.ru/>
24. Сайт компании ООО «Техно-центр»: [сайт]. URL: <http://techno-centr.ru/>
25. Информационный портал «PROMPAGES.RU» : [сайт]. URL: <http://prompages.ru/>
26. Сайт компании ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»: [сайт]. URL: <http://stroytechnologiya.promportal.su/>
27. *Ильевич, А.П.* Машины и оборудование для заводов по производству керамики и огнеупоров / А.П. Ильевич. – М.: Высшая школа, 1979. – 344 с.
28. *Моргулис, М.Л.* Вибрационное измельчение материалов / М.Л. Моргулис. – М.: Промстройиздат, 1957. – 107 с.
29. *Катаев, Е.Ф.* Мельницы сверхтонкого измельчения / Е.Ф. Катаев, В.С. Богданов, Н.Д. Воробьев – Белгород: Изд-во БТИСМ, 1988. – 87 с.
30. Grindig Mills – Rod, Ball and Autogenously // Mining magazine. – 1982. – В. 147. - № 9. – P. 91.
31. *Орехова, Т.Н.* Изучение роторно-вихревых мельниц для производства минеральных порошков / А.А. Романович // Механизация строительства. 2016.- № 8. – С. 44-46.
32. *Рыбин, В.Р.* Исследование отбойно-вихревых классификаторов / В.Р. Рыбин, С.Я. Бокштейн // Сборник трудов ВНИИНСМ, 1960. – 132 с.
33. *Сиваченко, Л.А.* Роторно-цепные дробилки-мельницы / Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.В. Береснев, В.А. Шуляк // Строительные и дорожные машины. – 1996. – № 5. – С. 21-22.
34. *Лисицина, В.И.* Роторно-вихревые мельницы Титан МД / В.И. Лисицина, В.И. Павлов // Титан. – СПб: Издание ЗАО «Новые Технологии», 2005. - №4. – С. 7-9.
35. *Правдина, М.Х.* Вихревая мельница для измельчения хрупких и пластичных материалов / М. Х. Правдина // Наука Урала. – Екатеринбург: 2003 г. - №23. – 25 с.

36. *Schranz H.* Selektive Zerkleinerung / H. Schranz, W. Berghober. – Leipzig, 1958. – № 6. – S. 175-182.
37. *Лозовая, С.Ю.* Создание методов расчета и конструкций устройств с деформируемыми рабочими камерами для тонкого и сверхтонкого помола материалов: Автореф. дис. ... док. техн. наук: 05.02.13 / Иван. гос. архитектур.-строит. акад. – Иваново., 2005. – 36 с.
38. *Россиян, А.А.* К проблеме создания высокоэффективных помольных агрегатов повышенной производительности / А.А. Россиян, Л.А. Сиванченко, Д.М. Хононов // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование. – Могилев: МГТУ, 2003. – С. 313-315.
39. *Сиванченко, Л.А.* Адаптивные методы переработки минерального сырья и новые примеры их реализации / Л.А. Сиванченко, А.А. Россиян, Д.М. Хононов // Сб. науч. тр. Молодых ученых Белорусско-Российского ун-та. – Могилев: БРУ, 2004. – С. 60-64.
40. *Сиванченко, Л.А.* Оборудование адаптивного действия для переработки дисперсных материалов / Л.А. Сиванченко, О.В. Голушкова, Е.А. Шаройкина, Д.М. Хононов // Матер, междунар. науч. конф. Механики XXI века. – Братск: Бр. ГТУ, 2006. – С. 75-84.
41. *Акунов, В.И.* Струйные мельницы. Элементы теории и расчета / В.И. Акунов. – М.: Машгиз, 1962. – 264 с.
42. *Акунов, В. И.* Экспериментальные исследования установок для тонкого измельчения с противоточными струйными мельницами: Дисс. ... канд. Техн. наук: 05.02.13 / В.И. Акунов // ВНИИНСМ. – М., 1961. – 229 с.
43. *Акунов, В.И.* Струйные мельницы. 2-е изд. / В.И. Акунов. – М.: Машиностроение, 1967. – 257 с.
44. *Акунов, В.И.* Струйные мельницы. Теория. Рациональный типаж. Применение: Автореф. Дис. ... док. Техн. наук: 05.02.13 / В.И. Акунов // МИСИ. – М., 1989. – 44 с.

45. *Акунов, В.И.* Закономерности измельчения строительных материалов на противоточной струйной мельнице / В.И. Акунов, И.Ж. Буслаева// Цемент, - 1988. - №1. – с.20 -23.
46. *Кузьмина, В.П.* Механоактивация цементов / В.П. Кузьмина // Строительные материалы. – 2006. - №5. – С. 7 – 9.
47. *Ляшко, Ф.И.* Оборудование для тонкого измельчения: Каталог / Ф.И. Ляшко, А.Н. Шаблиенко – М.: НИИинформаш, 1985. – 32 с.
48. *Пироцкий, В.З.* Состояние и направление развития техники измельчения и интенсификации процессов помола цемента: Обзор / В.З Пироцкий. – М.: ВНИИЭСМ, 1973. – 64 с.
49. Патент № GB2145351 кл. B02C 19/06, 1985 г. (Англия)
50. Патент США № 4579283 Fluidized bed jet mill eliminated courses of mill wear, Chem. Proses, 1984, № 47, p. 76.
51. *Филин, В.Я.* Современное оборудование для тонкого и сверхтонкого измельчения / В. Я. Филин, М.В. Акимов. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. – 47 с.
52. *Уваров, В.А.* Струйные мельницы. Монография / Уваров В.А., Шарапов Р.Р. – Белгород: изд-во БГТУ, 2012. – 144 с.
53. *Хлудеев, В.И.* Струйная мельница с отбойной плитой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / В.И. Хлудеев // БелГТАСМ. – Белгород, 2002. – 24 с.
54. Патент РФ № 49736. Струйная мельница с самофутерующейся камерой помола. Хлудеев В.И., Уваров В.А., Карпачев Д.В., Ярыгин А.А. Оpubл. в БИ №34 2005 г.
55. Патент РФ №100431. Установка для пневматической механоактивации цемента. Овчинников Д.А., Уваров В.А., Уваров А.В. Оpubл. В БИ №35, 2010 г.
56. Официальный сайт компании «NETZSCH»: [сайт]. URL: <https://www.netzsch-grinding.com/>
57. Патент РФ №2065796 на изобретение от 27.08.1996 МПК B02C13/14.

58. Патент РФ №2376067 на изобретение от 26.05.2008 МПК В02С19/00.
59. Патент США №US 2014/0326814. Micronizing device for fluid jet mills. Aleardo Cattivelli. Pub. Date: 6.11.2014
60. Патент США №US 2017/0374516. Drug/carrier inclusion composites prepared by a mechanochemical activation process using high-energy fluid-jet mills. Fabio Carli, Molinazzo Di Monreggio, Piero Lamartino, Milko leone. Pub. Date: 25.12.2014
61. Патент РФ №8637 на полезную модель от 16.12.1998 МПК В02С19/06.
62. Патент РФ №78693 на полезную модель от 06.08.2008 МПК В02С19/06.
63. Патент РФ № 91681 на полезную модель от 20.04.2009 МПК В02С13/14.
64. Патент РФ № 92621 на полезную модель от 16.11.2009 МПК В02С19/06.
65. Патент РФ № 97127 на полезную модель от 22.01.2010 МПК С04В7/04.
66. Патент РФ № 98185 на полезную модель от 09.06.2010 МПК С04В7/00.
67. Патент РФ № 129847 на полезную модель от 09.01.2013 МПК В02С19/06.
68. Патент РФ № 135275 на полезную модель от 18.07.2013 МПК В02С19/06.
69. Патент РФ № 1570107 на изобретение от 27.01.1996 МПК В02С19/06.
70. Патент РФ № 2013133 на изобретение от 30.05.1994 МПК В02С19/06.
71. Патент РФ № 2026742 на изобретение от 20.01.1995 МПК В02С19/06.
72. Патент РФ № 2036729 на изобретение от 09.06.1995 МПК В02С19/06.
73. Патент РФ № 2049557 на изобретение от 10.12. 1995 МПК В02С19/06.
74. Патент РФ № 2049558 на изобретение от 10.12.1995 МПК В02С19/06.
75. Патент РФ № 2188077 на изобретение от 16.11.2000 МПК В02С19/06.
76. Патент РФ № 2188078 на изобретение от 27.08.2001 МПК В02С19/06.
77. Патент РФ № 2254627 на изобретение от 12.11.2003 МПК В02С19/06.
78. Патент РФ № 2381070 на изобретение от 24.06.2008 МПК В02С13/20.
79. Патент РФ № 2097136 на изобретение от 27.11.1997 МПК В02С19/06.
80. Уваров, В. А. Разработка, исследование, методики расчета конструктивно-технологических параметров противоточных струйных мельниц: Дисс. ... канд. Техн. наук: 05.02.13 / В.А. Уваров // БГТАСМ. – Белгород., 1996. – 229 с.

81. *Уваров, В. А.* Научные основы проектирования и создания пневмоструйных мельниц: Дисс. ... док. техн. наук: 05.02.13 / В.А. Уваров // БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2006. – 404 с.
82. *Ярыгин, А.А.* Пневмоструйная мельница с эффектом самофутеровки помольной камеры: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13 /БГТУ им. В.Г. Шухова. –Белгород., 2006. – 151 с.
83. *Овчинников Д.А.* Установка для пневматической механоактивации цемента: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13 /БГТУ им. В.Г. Шухова. –Белгород., 2013. – 151 с.
84. *Подзьяков, С.С.* Пневмоструйная противоточная мельница для избирательного измельчения и обогащения: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13 /БГТУ им. В.Г. Шухова. –Белгород., 2007 – 184 с.
85. *Старчик, Ю.Ю.* Струйная мельница с цилиндрической камерой помола: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13 /БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород., 2009 – 165 с.
86. *Абрамович, Г.Н.* Прикладная газовая динамика / Г.Н.Абрамович 3-е изд. – М.: Изд-во Наука, 1969. – 824 с.
87. *Абрамович, Г.Н.* Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников и др. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
88. *Соколов, Е.Я.* Струйные аппараты. Изд. 2-е / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергия, 1970. – 288 с.
89. *Стернин, Л.Е.* Основы газодинамики двухфазных течений в соплах / Л.Е. Стернин.- М.: Машиностроение, 1978. – 284 с.
90. *Голеевский, А.А.* Вопросы механики струйного движения жидкостей и газов / А.А. Голеевский. – М.: Машгиз, 1957. – 824 с.
91. *Акунов, В.И.* Струйные мельницы. Теория. Рациональный типаж. Применение: Автореф. Дис. ... док. Техн. наук: 05.02.13 / В.И. Акунов // МИСИ. – М., 1989. – 44 с.

92. *Акунов, В.И.* Выбор промышленной противоточной мельницы / В.И. Акунов // Строительные и дорожные машины. – 1989. – №11. – с.16 – 17.
93. Патент РФ №174065 на полезную модель от 10.01.17 МПК В08С19/06
94. *Булгаков, С.Б.* Струйная противоточная мельница с дополнительным подводом энергоносителя: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / С.Б. Булгаков // БелГТАСМ. – Белгород, 2002. – 20 с.
95. *Шеремет, Е.О.* Вычисление пропускной способности разгонной трубки эжекторного узла пневмоструйной мельницы / В.А. Уваров, Ю.Ю. Старчик, Е.О. Шеремет // Строительные и дорожные машины. - 2018. №10. С. 22-26.
96. *Блехман, И.И.* Вибрационная механика. – М: Физматлит. 1994. – 400 с.
97. *Адлер, Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
98. *Зедгинидзе, И.Г.* Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976.–330 с.
99. *Овчинников, И.А* Сепаратор с дополнительной зоной разделения для струйного противоточного помольного комплекса: Автореф. Дис. ... канд. Техн. наук: 05.02.13 / И.А. Овчинников // БГТУ им В.Г. Шухова. – Белгород, 2004. – 22 с.
100. *Жуков, В.П.* Расчетно-экспериментальное исследование процессов измельчения материалов в струйной мельнице / В.П. Жуков, Х. Отвински, Г. Мешеунов // Известия вузов. Химия и химическая технология – 2002. Т.15, №4. – с. 157 – 159.
101. *Колмыкова, Т.С.* Инвестиционный анализ: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2009. – 204 с.
102. *Аввакумов, Е.Г.* Механические методы активации химических процессов / Е.Г. Аввакумов – Новосибирск: Наука, 1960. – 297 с.
103. *Альтшуль, А.Д.* Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселёв. – М.: Стройиздат, 1975. – 385 с.

104. *Андреев, С.Е.* Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава / С.Е. Андреев, В.В. Товаров, В.А. Перов. – М.: Металлургиздат, 1959. – 437 с.
105. *Банит, Ф.Г.* Механическое оборудование цементных заводов / Ф.Г. Банит, О.А. Несвижский – М.: Машиностроение, 1975. – 318 с.
106. *Барский, М.Д.* Фракционирование порошков / М.Д. Барский. – М.: Недра, 1980. – 327с.
107. *Барский, М.Д.* Гравитационная классификация зернистых материалов / М.Д. Барский, В.И. Ревнивцев, Ю.В. Соколкин. – М.: Недра, 1974. – 232 с.
108. *Беке, Б.* Проблемы тонкого измельчения цемента / Б. Беке. – М.: ВНИИЭСМ, 1971. – 17 с.
109. *Биргер, В.С.* Справочник по пыле- и золоулавливанию./ Под ред. А.А. Русанова. – 2-е изд., перераб. / В.С. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
110. *Бронштейн, И.Н.* Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Физматгиз, 1980. – 976 с.
111. *Буссройд, Р.* Течение газа со взвешенными частицами / Р. Буссройд. – М.: Мир, 1975. – 373 с.
112. *Вердиян, М.А.* Процессы измельчения твердых тел / М.А. Вердиян, В.В. Кафаров // Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1977. Т. 5 – С. 5-89.
113. *Гиршович, Т.А.* Турбулентные струи в поперечном потоке / Т.А. Гиршович – М.: Машиностроение, 1993. – 256 с.
114. *Демидович, Б.П.* Численные методы анализа / Б.П. Демидович, П.А. Марон, Э.З. Шувалова. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
115. *Душкин, А.В.* Возможности механохимической технологии органического синтеза и получения новых материалов / А.В. Душкин // Химия в интересах устойчивого развития / - 2004. - №3, Т.12. – С. 351 – 274.

116. *Идельчик, И.Е.* Аэрогидродинамика технологических аппаратов / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
117. *Латышев, С.С.* Трубная шаровая мельница с внутренним рециклом загрузки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / С.С. Латышев // БГТУ им. В.Г. Шухова – Белгород, 2005. – 22 с.
118. *Логачев, И.Н.* Аэродинамические основы аспирации / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. – С-Пб.: Химия, 2005. – 659 с.
119. *Уваров, В.А.* Расчет конструктивно-технологических параметров струйных мельниц / В.А. Уваров, В.С. Богданов, Р.В. Гаврилов // Изв. Вузов. Строительство. – 1996. – № 10. – С. 113-119.
120. *Уваров, В.А.* Некоторые аспекты методики расчета технологических и конструктивных параметров противоточных струйных мельниц / В.А. Уваров // Промышленность строительных материалов в стройиндустрии, энерго и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений: Сб. докл. Междунар. Конф., Ч. 4. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1997. – С. 130 – 134.
121. *Уваров, В.А.* К вопросу об определении скорости частиц измельчаемого материала в помольной камере противоточной струйной мельницы / В.А. Уваров, В.П. Воронов, Д.В. Карпачев // Новые технологии в химической промышленности: Материалы докл. Междунар. Научно-технической конф., Ч. 2. – Минск: Изд-во БГТУ, 2002. – С. 231 – 233.
122. *Уваров, В.А.* Моделирование движения энергоносителя в сепараторе с дополнительной зоной разделения / В.А. Уваров, В.П. Воронов, И.А. Овчинников, Д.В. Карпачев // Строительные и дорожные машины. – 2004. – № 12. – С. 29-31.
123. *Уваров, В.А.* Расчет области эффективного взаимодействия измельчаемого материала в помольной камере противоточной струйной мельницы / В.А. Уваров, В.П. Воронов, Д.В. Карпачев, И.А. Овчинников // Строительные и дорожные машины. – 2006. – № 2. – С. 39-41.

124. *Уваров, В.А.* Математическая модель движения двухкомпонентной смеси в зоне помола струйной мельницы с отбойной плитой / В.А. Уваров // Строительные и дорожные машины. – 2006. – № 8. – С. 32-33.
125. *Уваров, В.А.* Применение противоточной струйной мельницы в технологии производства электроизоляционной керамики / В.А. Уваров // Стекло и керамика. – 2006. – № 8. – С. 29-31.
126. *Уваров, В.А.* Оптимизация параметров работы пневмоструйной противоточной мельницы / В.А. Уваров // Омский научный вестник. – 2006. – № 2 (35). – С. 117-119.
127. *Уваров, В.А.* Определение степени разрежения в помольной камере противоточной пневмоструйной мельницы / В.А. Уваров // Омский научный вестник. – 2006. – № 5 (39). – С. 110-112.
128. *Уваров, В.А.* Теоретическое исследование измельчения материалов в струйных аэродинамических мельницах / В.А. Уваров, В.П. Воронов, С.С. Поздняков // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 7. – С. 40-41.
129. *Уваров, В.А.* Расчет конструктивных параметров цилиндрической камеры помола пневмоструйной мельницы / В.А. Уваров, В.П. Воронов, Ю.Ю. Старчик // Строительные и дорожные машины. – 2009. – № 6. – С. 32-33.
130. *Стернин, Л.Е.* Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами / Л.Е. Стернин. М.: Машиностроение, 1980. - 172с.
131. *Постникова, И.В.* Струйные мельницы / И.В. Постникова, В.Н. Блиничев, Я. Кравчик // Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. - 2015. №2 (42). С. 144-151.
132. *Горобец, В.И.* Оптимизация параметров и разработка способа автоматического регулирования газоструйной мельницы: Автореф. Дис. ... канд. техн. наук. / В.И. Горобец // Днепропетр. горный ин-т им. Артема. – Днепропетровск., 1972. – 21 с.
133. *Жуков, В.П.* Расчетно-экспериментальные исследования процессов в струйных мельницах кипящего слоя / В.П. Жуков, С.Ф. Смирнов, Ненгук

Otwinowsky, Piotr Kaniowski // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - 2009. № 4. С. 74-77.

133. *Горягин, П.Ю.* Влияние акустического излучения на частицы в струйных мельницах // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2015. С. 721-722.

134. *Осипов, Д.А.* Расчетно-экспериментальное исследование измельчения смеси разнородных компонентов в струйной мельнице циркулирующего кипящего слоя / Д.А. Осипов, В.П. Жуков, В.Е. Мизонов, А.В. Огурцов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. - 2019. Т. 62. № 1. С. 98-106.

135. *Кизилова, О.М.* Разработка различных вариантов исполнения сопла струйной противоточной мельницы МПС-2Т // IX Международный молодежный форум "Образование. Наука. Производство" Белгород, 2017. С. 1275-1278.

136. *Сумской, Д.А.* Прочностные характеристики вяжущих композиций, полученных в вихревой струйной мельнице / Д.А. Сумской, Ю.А. Дементьев, О.С. Абрамов, Р.С. Фаизов и др. // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова - 2017. С. 1820-1825.

137. *Сумской, Д.А.* Изучение процесса измельчения вяжущих композиций в вихревой струйной мельнице / Д.А. Сумской, Ю.А. Дементьев, О.С. Абрамов, Р.С. Фаизов и др. // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова - 2017. С. 1826-1831.

138. *Барьяхтар, Ф.Г.* Активация солевого алюминиевого шлака на вихревой центробежно-струйной мельнице / Ф.Г. Барьяхтар, С.А. Басурин, Д.А. Еременко, И.И. Котельницкий // Вестник МАНЭБ. - 2017. Т. 22. № 1. С. 34-37.

139. *Фадин, Ю.М.* Разгонная трубка струйной мельницы / Ю.М. Фадин, С.С. Латышев, С.И. Анциферов, О.М. Кизилова, В.А. Трубаева // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для

производства строительных материалов. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. - 2017. С. 251-254.

140. *Кизилова, О.М.* Анализ и применение мельниц струйной энергии / О.М. Кизилова, А.Е. Ченцов, Е.Г. Шеметов // Молодежь и научно-технический прогресс Сборник докладов IX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 томах. - 2018. С. 41-44.

141. *Бараковских, Д.С.* Движение двухфазного потока в разгонной трубке струйной мельницы / Д.С. Бараковских, С.Ф. Шишкин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова . - 2017. - № 5. С. 82-88.

142. *Бараковских, Д.С.* Движение частиц в разгонной трубке струйной мельницы при малых концентрациях / Д.С. Бараковских, С.Ф. Шишкин, А.С. Шишкин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова . - 2016. - № 4. С. 121-128.

143. *Старчик, Ю.Ю.* Математическая модель определения скоростей энергоносителя в струйной мельнице с цилиндрической камерой помола / Ю.Ю. Старчик, В.Г. Дмитриенко, Е.Г. Шеметов // Механизация строительства. - 2016. - Т. 77. № 5. С. 47-52.

144. *Карпачев, Д.В.* Исследование износостойкости материала футеровки струйной мельницы / Д.В. Карпачев, А.А. Ярыгин, А.Л. Веретнов // Механики XXI века. - 2005. - № 4. С. 11-13.

145. *Карпачев, Д.В.* Тонкое измельчение частиц при взаимодействии двухфазных струй в противоточной струйной мельнице / Д.В. Карпачев, И.А. Семикопенко // «Наукоемкие технологии инновации». Юбилейная международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова, XXI научные чтения. - 2014. С. 52-58.

146. *Бурьгин, И.В.* Утяжеленный безусадочный тампонажный цемент: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева. – Москва, 2012. – 16 с.

147. *Самсоненко, Н.В.* Расширяющийся облегченный тампонажный цемент: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева. – Москва, 2006. – 17 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Сухоложскцемент

Система качества сертифицирована по ГОСТ Р ИСО 9001:2001

Сертификат № РОСС RU.0001.13 ИСО3



ИСО3

Документ о качестве (стр. 2 из 2)

Портландцемент тампонажный без добавок

Спецификация API Spec 10A класс G тип HSR

торговая марка - **DylogCem D** ПЦТ I-G-CC-1 ГОСТ 1581 - 96
(API Spec 10A Class G HSR). Лицензия API № 10A-0056

Общество по сбыту тампонажных цементов

ООО "Дюккерхофф - Сухой Лог"

Результаты химического анализа

	Фактич. значение	Требования	
		API Spec 10A класс G тип высоко-сульфато-устойчивый (HSR)	ГОСТ 1581 - 96 ПЦТ I-G-CC-1
% Оксид магния (MgO)	2.90	max. 6.0	макс. 5.0 +)
% Трехокись серы (SO ₃)	2.80	max. 3.0	макс. 3.0 +)
% Потери при прокаливании	0.58	max. 3.0	макс. 3.0 +)
% Нерастворимый остаток	0.29	max. 0.75	макс. 0.75 +)
% Трехкальцевый силикат (3CaO*SiO ₂)	54.0	max. 6.5 min. 4.8	макс. 6.5 +) мин. 4.8 +)
% Трехкальцевый алюминат (3CaO * Al ₂ O ₃)	2.4	max. 3.0	макс. 3.0 +)
% (C ₄ AF + C ₃ A)	16.2	-	
Соотношение Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃ - TM - P	0.85		
Если глиноземистый модуль TM (-P) > 0.64, то % (C ₄ AF + 2 C ₃ A)	18.6	max. 2.4	макс. 2.4 +)
Если глиноземистый модуль TM (-P) < 0.64, то % (C ₄ AF + C ₂ F)		max. 2.4	
% Na ₂ O - эквивалент = (0.658 % K ₂ O + % Na ₂ O)	0.57	max. 0.75	макс. 0.75 +)

+) в клинкере

Радиационное качество

Эффективная концентрация естественных радионуклидов < 148.58 Бк/кг при норме 370 Бк/кг
Разрешен к применению в качестве строительного материала I класса (санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию, товар. № 66.01.32.570.П.001916.06.07 от 20.06.2007 г.)

Сертификат соответствия № РОСС RU.СЛ02.Н00401

ООО "Сухоложскцемент", г. Сухой Лог, Свердловская область

Начальник ОТК *В.И.С.*





Сухоложскцемент

Система качества сертифицирована по ГОСТ Р ИСО 9001:2001
Сертификат № РОСС RU.0001.13 ИСО3



ИСО3

Документ о качестве (стр. 1 из 2)

Портландцемент тампонажный без добавок

Спецификации API Spec 10A класс G тип HSR

торговая марка - **DylogCem D** ПЦТ I-G-CC-1 ГОСТ 1581 - 96

(API Spec 10A Class G HSR) Лицензия API № 10A-0056

Общество по сбыту тампонажных цемента

ООО "Дюккерхофф - Сухой Лог"

Потребитель ЗАО "Петрохим"

отправлено 65 тонн.

дата 23.08.09

из г. Сухой Лог ст. Крейда

номер вагона 612 855 24

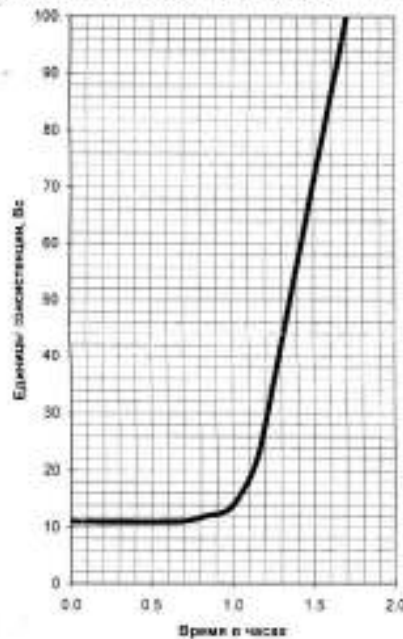
примечание: проба отобрана из силоса DylogCem 23.08.2009 г. в количестве 10 кг.

код пробы 06T1529701080065 партия № 31

Результаты испытаний по API Spec 10A. Для замешивания: 44 % H₂O

Тонкость 291 м²/кг (Блейн); Р_{пл.} = 1.9 кг/л = lb/gal; своб. флюид 3.6 %

Испытание времени застывания НРНТ - консистометром по API Spec 10A



а) API - программа 5. Иссл. специфик.

Глубина: 8000 фт = 2440 м

Конечная T: 125° F = 52° C

Время застывания: **103** мин.

(требуется 90 - 120 мин.)

б) API - программа _____

Глубина: _____ фт = _____ м

Конечная T: _____ ° F = _____ ° C

Время застывания: _____ мин.

Определение прочности на сжатие

Иссл. специфик.

T	P	час	МПа		psi	
			факт.	треб.	факт.	треб.
38°C	атм.	8	3.6	> 2.1;	522	> 300
60°C	атм.	8	12.5	> 10.3;	1813	> 1500

ОАО "Сухоложскцемент", г. Сухой Лог, Свердловская область

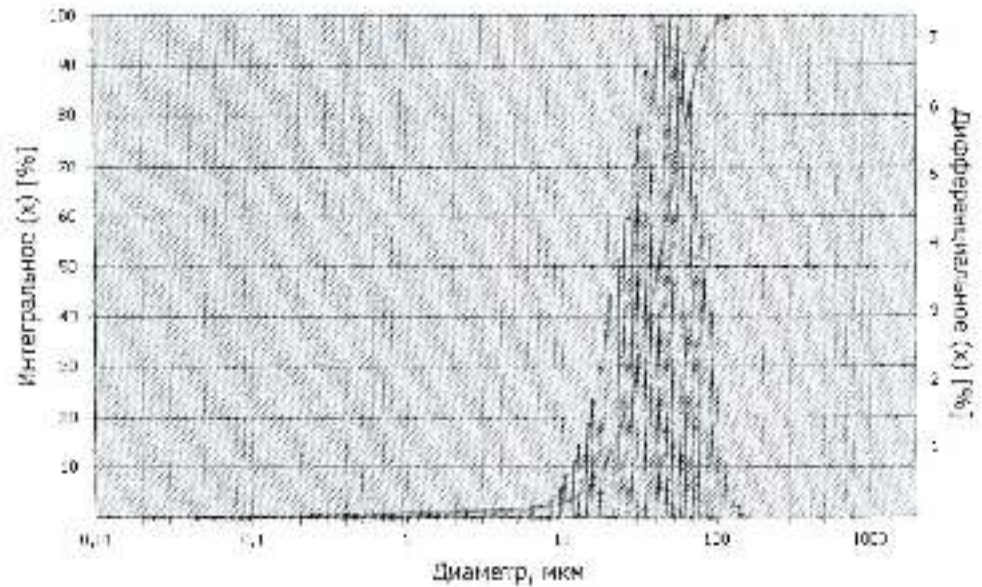
Начальник ОТК *В.И.К.*




FRITSCH
 ANALYSETTE 22 NanoTec plus

№ измерения: 5202 Дата: _____
 Материал: 1 № обр.: 1
 Компания: БГТУ им. В.Г. Шухова Комментарий: в دست воде

Теория: Fraunhofer TradeOff: broad (1000,0)
 Показ. преломл.: _____ Коэф. поглощ.: _____
 Сканир. шаг: 100 Сканир. ИК: 100 Каналы: 153 Затенение луча: 11,0 %
 Диапазон: 0,31 [µm] - 2000,00 [µm] Плотос: 20 % Ультразвук: 0 %



Модальный diam. 45,00 µm Размах (D90-D10)/D50 1,40 D[4,3] 45,2 µm
 Уд. поверхность 2238 см²/г Плотность 0 Уд. пов. по массе 0 см²/г

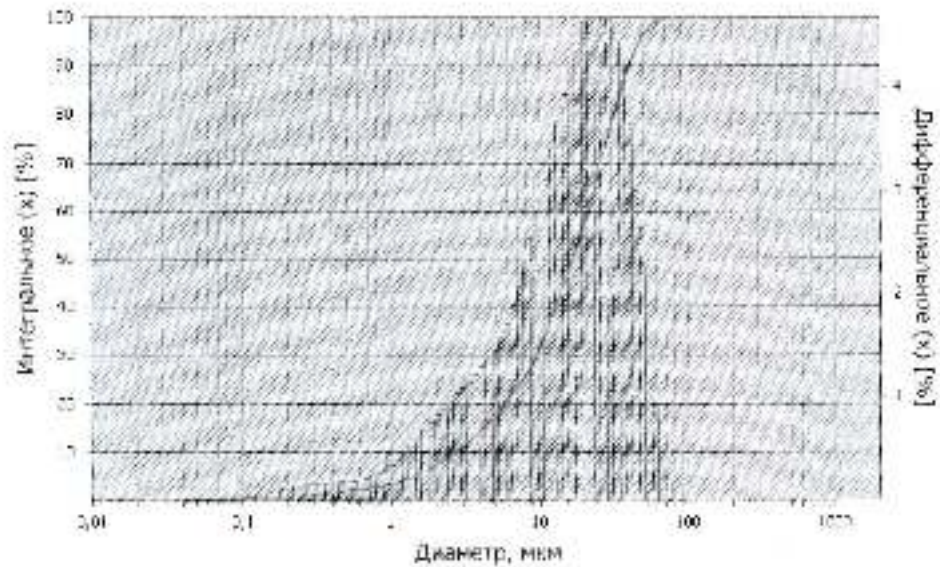
Диаметр (µm)	Интеграл (%)	Дифф. (%)
0,04	0	0
0,1	0	0
0,12	0	0
0,13	0,01	0,01
0,15	0,02	0,01
0,17	0,04	0,02
0,19	0,06	0,02
0,21	0,09	0,03
0,25	0,13	0,04
0,27	0,18	0,04
0,31	0,23	0,05
0,45	0,38	0,05
0,39	0,34	0,06
0,44	0,4	0,06
0,5	0,45	0,06
0,56	0,51	0,05

Процентиль (%)	Диаметр (µm)
10	28,09
50	45,17
90	77,3


ANALYSETTE 22 NanoTec plus


№ измерения: 5218 Дата: _____
 Материал: 3 № обр.: _____
 Компания: БГУ им. В.Г. Шухеев Комментарий: к лит. куд.

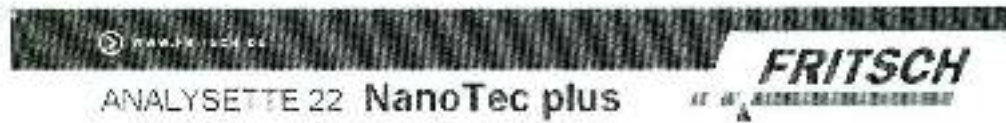
Творки: Granulober TradeOff: total (1333,0)
 Показ. преломл.: --- Коэф. поглощен.: ---
 Сканиров. зев.: 100 Сканиров. ИК: 100 Каналов: 128 Затенение луча: 11,0 %
 Диапазон: 0,01 [µm] - 2000,00 [µm] Насос: 20 % Ультразвук: 0 %



Модальный диам.: 29,14 µm Размах (M3-M0)/M3: 2,25 D[4,3]: 15,2 µm
 Уд. поверхность: 12333 см²/см³ Плотность: C Уд. пов. по насосу: C см²/г

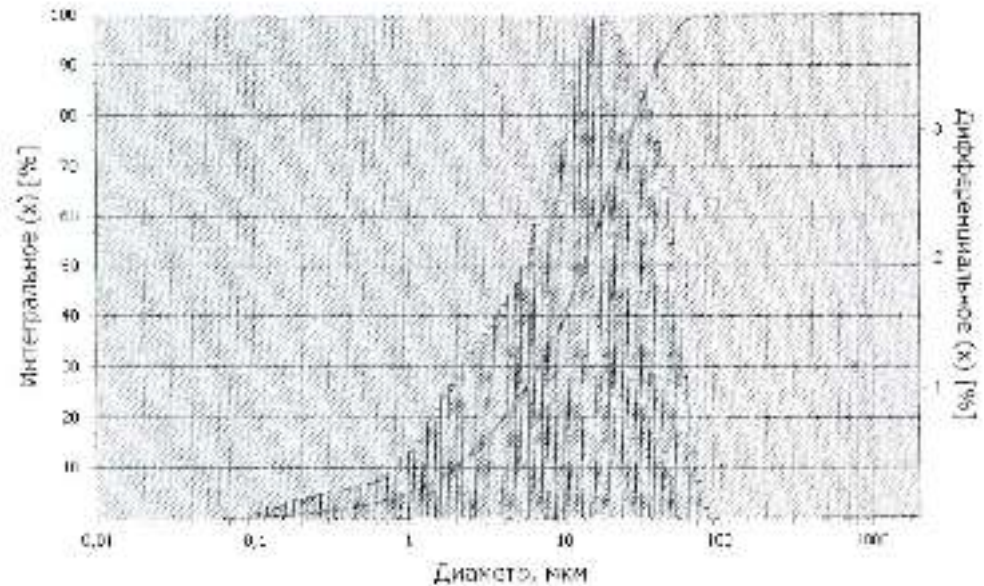
Диаметр [µm]	Интеграл [%]	Дифф. [%]
0,08	0	0
0,1	0,02	0,01
0,12	0,04	0,01
0,14	0,06	0,01
0,15	0,15	0,07
0,17	0,24	0,09
0,19	0,35	0,11
0,21	0,48	0,13
0,24	0,64	0,16
0,27	0,81	0,17
0,30	0,99	0,18
0,33	1,19	0,2
0,36	1,4	0,2
0,44	1,67	0,21
0,5	1,82	0,21
0,55	2,01	0,22

Процентиль [%]	Диаметр [µm]
10	2,68
50	15,54
90	40,21



№ измерения: 5289 Дата: _____
 Материал: 2 № обр.: _____
 Компания: ВГТУ им. В.Г. Шухвала Комментарий: в акст. вода

Теория: Fraunhofer TradeOff: broad (1000,0)
 Показ. преломл.: --- Коэф. поглощен.: ---
 Скоросв. жел.: 130 Скоросв. ИК: 130 Каналов: 153 Взаимная луча: 10,0 %
 Диапазон: 0,01 [µm] - 2000,00 [µm] Насос: 70 % Ультразвук: 0 %



Модальный диам.: 17,00 µm Размах (по ширине): 7,86 D[4,3]: 17,2 µm
 Уд. поверхность: 10080 см²/см³ Плотность: 0 Уд. пов. по массе: 0 см²/г

Диаметр [µm]	Интеграл [%]	Дифф. [%]
0,02	0	0
0,1	0,04	0,03
0,12	0,09	0,05
0,15	0,16	0,07
0,17	0,26	0,1
0,19	0,38	0,12
0,21	0,54	0,16
0,24	0,77	0,2
0,27	1,14	0,37
0,31	1,57	0,43
0,35	2,03	0,46
0,39	2,59	0,56
0,44	3,18	0,59
0,5	4,46	0,79
0,56	5,77	0,81

Процент [%]	Диаметр [µm]
10	1,92
50	13,1
90	39,69

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 174065

СТРУЙНАЯ МЕЛЬНИЦА ТОНКОГО ПОМОЛА

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Уваров Валерий Анатольевич (RU), Орехова Татьяна Николаевна (RU), Леонов Александр Николаевич (RU), Булгаков Сергей Борисович (RU), Шеремет Евгений Олегович (RU)*

Заявка № 2017100706

Приоритет полезной модели: **10 января 2017 г.**

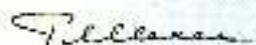
Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации: **28 сентября 2017 г.**

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает: **10 января 2027 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


 Е.Н. Кузнецов


РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2017100706, 10.01.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.01.2017

Приоритет(ы):

(23) Дата подачи заявки: 10.01.2017

(43) Опубликовано: 28.09.2017 Бюл. № 28

Адрес для переписки:

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ
им. В.Г. Шукова, отдел создания и охраны
объектов интеллектуальной собственности(19) **RU** (11) **174 065**⁽¹⁵⁾ **U1**(51) МПК
B02C 1/006 (2015.01)

(72) Автор(ы):

Уваров Валерий Анатольевич (RU),
Орехова Татьяна Николаевна (RU),
Левков Александр Николаевич (RU),
Булгаков Сергей Борисович (RU),
Шеремет Евгений Олегович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Белгородский государственный
университет имени В.Г.
Шукова" (RU)(56) Список документов, цитированных в тексте
описания: SU 1604477 A1, 07.11.1990; SU
118693 A1, 01.01.1959; SU 886945 A1,
07.12.1981; SU 561572 A1, 15.06.1977.**(54) СТРУЙНАЯ МЕЛЬНИЦА ТОНКОГО ПОМОЛА**

(57) Формула полезной модели

Струйная мельница тонкого помола, содержащая вертикальную помоловую камеру с установленными разгонными трубками и эжекторными узлами, отличающаяся тем, что разгонные трубки проходят через внутренний корпус помоловой камеры под углом 45° и расположены в виде верхнего и нижнего поясов, направленных друг другу, в основании которых размещены эжекторные узлы.

RU 174065 U1

RU 174065 U1

СПРАВКА**о внедрении результатов диссертационной работы**

В период с февраля по ноябрь 2017 г. на ЗАО «Петрохим» было осуществлено внедрение результатов диссертационного исследования аспиранта кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» БГТУ им. В.Г. Шухова Шеремет Евгения Олеговича. В частности, промышленного внедрения пневмоструйной установки тонкого помола патент на полезную модель №174065.

Технические и конструкторские решения, предложенные Шеремет Е.Е., позволили увеличить тонкость помола цемента используемого для тампонирования нефтегазовых скважин.

Полученные результаты по удельной поверхности соответствуют ТУ 2458-066-54651030-2010 Цементная смесь для тампонажного раствора на углеродной основе ЦС БТРУО марка «Микро» до 5 мкм.

Настоящей справкой подтверждается, что диссертационная работа Шеремет Е.О., содержит комплекс решений, направленных на реализацию конкретных мероприятий, позволяющих повысить эффективность производственного процесса и конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Директор ЗАО «Петрохим»



Малютин С.А.