

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

СОЛОДОВНИКОВ Анатолий Михайлович

УДК 541.189:539.612

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ, РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ
БОРЬБЫ С ПЫЛЬЮ НА ОСНОВЕ
ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЫ И АСПИРАЦИИ**

Специальность 05.26.01 —
«Охрана труда и пожарная безопасность»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Днепропетровском инженерно-строительном институте

Научный консультант

доктор геолого-минералогических наук, проф. КРИКУНОВ Г.Н.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ГАГАУЗ Ф.Г.

доктор технических наук, профессор КРЕМЕНЧУДСКИЙ Н.Ф.

доктор технических наук, профессор ТИН Р.В.

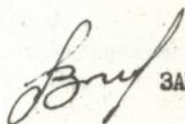
Ведущее предприятие - Институт геотехнической
механики АН Украины

Защита диссертации состоится "17" СЕНТЯБ 1993 г.
в 14 час. на заседании специализированного совета
Д 068.08.02 в Днепропетровском горном институте (320600, ГСП,
г.Днепропетровск, 27, проспект Карла Маркса, 19).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "17" СЕНТЯБ 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук,
доцент

 ЗАЙКА В.Т.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00815139 (R)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Научно-технический прогресс расширил использование природных ресурсов, обусловил подъем промышленного производства. Вместе с тем НТП привел к некоторым негативным последствиям, одним из которых является растущее загрязнение воздушной среды вредными веществами, в том числе пылевыми аэрозолями. Пыль является причиной профессиональных заболеваний, снижения производительности труда, возможных травм и аварий. Способствует ускорению коррозии оборудования, материалов, уменьшению продуктов естественного и искусственного биосинтеза, является причиной гибели флоры и фауны. Улавливание пыли не только устраняет указанные отрицательные факторы, но и способствует возвращению ее в технологический процесс в виде сырья, ценного продукта. Поэтому борьба с пылью является первоочередной задачей общества. В последние годы в области борьбы с пылью достигнуты значительные успехи. Вопросы, связанные с обеспыливанием, решаются на научной основе. Этому способствует непрерывное совершенствование теории и практики методов борьбы с пылью, технологии производства. Однако в ближайшей перспективе в связи с интенсификацией производства невозможно обеспечить снижение запыленности воздуха в рабочей зоне до ЦДК без дальнейших широких научно-технических мероприятий, полученных на основе комплексных исследований. Особую остроту и актуальность все больше приобретает проблема защиты производственной среды, в том числе окружающей. Решение поставленной научной проблемы явилось темой диссертационной работы, которая предусматривает развитие теории и разработку новых способов борьбы с пылью на основе использования газожидкостной среды и аспирации. Это направление является наиболее эффективным из известных в настоящее время, однако не находит широкого промышленного распространения по причине отсутствия надежных инженерных решений, базирующихся на исследованиях механизма взаимодействия пылевых частиц с пеной. Как показал проведенный обзор проблемы обеспыливания, успешное применение пены основано на высокой смачивающей и экранирующей способностях, так как ее суммарная поверхность значительно больше распыленной поверхности жидкости, из которой она получена, что повышает вероятность встречи пылинки с рабочей средой. Наличие ПАВ улучшает смачивающее действие пено-раствора, а проявление капиллярных явлений в пене увели-

чивает силы, удерживающие пылинки на пузырьках пены. Все это создает, очевидно, более благоприятные условия по сравнению с гидроорошением. Пены, как средство обеспыливания, применяли на шахтах Донбасса на очистных, проходческих комбайнах, пунктах перегрузки, пересыпки, выгрузки угля в транспортных системах, на металлургических заводах, предприятиях стройиндустрии, химпредприятиях. Внедрение метода позволило в 10 и более раз уменьшить ее содержание в рабочей зоне. Реализация метода осуществляется в основном двумя способами: в виде пылеподавления и путем перемешивания пены с материалом. При пылеподавлении осуществляют укрытие поверхности источника пылеобразования пеной. При этом экранируют всю поверхность от распространения пыли в окружающую среду, пена контактирует не только с пылевыми частицами, но и с материалом, что способствует его увлажнению и перерасходу пены, часть ее теряется от саморазрушения и удара о пылеисточник. Следовательно, с экономической точки зрения, способ пылеподавления имеет ряд недостатков, обусловленных потерей материальных и энергетических затрат; при реализации способа перемешивания материала с пеной, как и при экранировании, эффективность достигает 99 %, с расход газожидкостной среды почти в 1,5 раза больше.

Контакт газожидкостной среды с материалом усложняет управление процессом обеспыливания и затрудняет применение физико-математического моделирования для проведения аналитических исследований. Поэтому имеющиеся работы по борьбе с пылью пенным способом в основном посвящены рассмотрению отдельных сторон этого сложного процесса на основе экспериментальных исследований и требуют дополнительных аналитических исследований.

В диссертации решается научная проблема, имеющая социальное народно-хозяйственное значение, заключающееся в разработке и развитии теоретических положений борьбы с пылью с использованием газожидкостной среды и аспирации на основе установления закономерностей механизма взаимодействия трехфазной среды "пыль-газ-пена", вида - сепарации пыли из воздушного потока, разделение поверхности рабочей среды на зоны с различным механизмом пылеулавливания, ускорения осаждения частицы на поверхность пены как функции дисперсности пыли, пузырьков пены, формы препятствия, электрического заряда пены, что позволяет обеспы-

печатать здоровые и безопасные условия труда.

Связь темы диссертации с государственными научными программами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с целевой комплексной программой 0116300000 "Разработать научные основы обеспыливания угольных шахт и разрезов" (№ ГР 81054826), проведенной в период 1981-1985 годы по заказу Минуглепрома СССР, республиканской научно-технической программой на 1986-1990 годы РН.99.01 "Разработать и внедрить на предприятиях различных отраслей народного хозяйства мало- и безотходные технологические процессы и оборудование, обеспечивающие наиболее рациональное использование природных ресурсов и максимальную переработку образующихся отходов производства и вторичного сырья"; научно-исследовательской работой по направлению 2.26 "Физико-химические основы металлургических процессов" (I ГР 81040497), осуществленной в период 1986-1990 годы по координационному плану АН УССР; государственной научно-технической программой "Энергия" на 1989-2005 годы, раздел "Экологически чистый угольный разрез".

Цель работы. Создание научных основ, разработка и развитие способов борьбы с пылью с использованием воздушно-механической пены и аспирации, позволяющих получить инженерные решения, направленные на улучшение условий труда, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышение эффективности управления процессом обеспыливания.

Идея работы заключается в использовании и развитии теоретических закономерностей динамических процессов взаимодействия трехфазной среды "пыль - газ - препятствие", структурно-механических свойств пленок и пен; в оценке эффективности обеспыливания пеной с учетом механизма их взаимодействия с целью решения проблемы борьбы с пылью на основе газожидкостной среды и аспирации.

Основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту, их новизна. На основании теоретических и экспериментальных исследований сформулированы следующие научные положения:

1. Стадии процесса взаимодействия пылевого аэрозоля с пеной определяются ее структурно-механическими свойствами и действующими капиллярными, гравитационными, электрическими силами, явлениями и процессами, происходящими в газожидкостной среде и нахо-

дятся в зависимости от скорости осаждения частиц, величины расклинивающего давления, вида удара пылинки о поверхность пены, физико-химических свойств пыли и пены, характеризуют эффективность встречи пылинок с рабочей средой, смачиваемость, агломерирование, которая достигает пределов до 98-99 % и дает возможность перейти к широкому его внедрению. Так, вид удара частицы о поверхность пузырька пены во многом определяется смачиваемостью твердой частицы, а потеря кинетической энергии частицы в слое пены характеризуют ее толщину. Энергоемкостный показатель работы системы обеспыливания позволяет выбрать не только эффективный способ реализации, но и обеспечить минимальные энергетические затраты.

2. Механизм взаимодействия пылевого потока с плоским препятствием в виде пенного слоя определяется закономерностью сепарации пыли из воздушного потока на ее поверхность в зависимости от кинетической энергии и дисперсности пыли, разделением поверхности пенного слоя на зоны инерционно-адгезионного и турбулентно-адгезионного взаимодействия. Позволяет перейти к разработке нового способа борьбы с пылью, установить геометрические параметры пенной завесы, характеризующие эффективность пылеулавливания и оптимальный расход пены. Управление эффективностью пылеулавливания осуществляется за счет шероховатости поверхности пенного слоя, то есть дисперсности пузырьков пены. Толщина слоя пены в основном определяется не концентрацией пыли, а ее кинетической энергией и дисперсностью. При равной концентрации толщина слоя для крупнодисперсной пыли в 1,5-2 раза больше, чем для мелкодисперсной.

3. Новый способ борьбы с пылью в виде улавливания пыли армированной пенной завесой, характеризующийся отсутствием контакта пены с сыпучим материалом или сырьем, саморазрушения и потерь пены при подаче на пылеисточник, то есть основанный на динамическом процессе, заключающемся в захвате пылевого аэрозоля поверхностью пены аналогично механизму гидроорошения. Это снижает расход раствора пенообразователя до 70 %, обеспечивает возможность управления процессом обеспыливания в зависимости от физико-химических свойств пыли и газообразной среды. Сплошность, жесткость пенной завесы обеспечивается металлической сеткой с ячейками (50 x 50) мм, что увеличивает скорость подачи

запыленного воздушного потока на поверхность пенной завесы в 1,6-2 раза и позволяет расширить условия применения нового способа.

4. Высокая эффективность улавливания тонкодисперсной пыли обеспечивается за счет инерционных сил, обусловленных турбулизацией запыленного воздушного потока возле пузырьчатой поверхности пенной завесы и естественной электризации пены, вызванной трибо-электрическим явлением на границе фаз стенки капилляра сетки, флуктуаций концентрации ионов в пенообразующей жидкости и осаждения газовых ионов сжатого воздуха на внутренней поверхности пленки пузырей. Ускорение осаждения частицы пыли на поверхность завесы увеличивается с уменьшением размера пылинки по квадратичному закону.

5. Контроль кратности пены в динамических условиях обеспечивается бесконтактным методом, основанным на измерении добротности колебательного контура при прохождении токопроводящей среды (пены) через измерительную индукционную ячейку. Повышает качество измерений, снижает трудоемкость и время отбора проб. На результаты измерений при этом не оказывает существенного влияния изменения параметров атмосферы и свойств индукционного контура.

Научные результаты и их новизна.

1. Разработана физическая модель взаимодействия пылевого потока с плоским препятствием в виде пенного слоя, позволяющая аналитически исследовать динамический процесс обеспыливания и определить скорости и координаты осаждения частиц на поверхность препятствия.

2. Определены стадии механизма взаимодействия пылевого аэрозоля с газожидкостной средой, разработана теория этого механизма, заключающаяся в получении аналитических зависимостей оптимальной скорости осаждения пылевых частиц на поверхность пены без ее разрушения, максимального радиуса частицы, при котором не происходит разрушение пленки пузырька пены, полной потери кинетической энергии пылинки в слое пены.

3. Разработан способ улавливания пыли армированной пенной завесой на основе исследований механизма взаимодействия пылевого потока с плоским препятствием в виде пенного слоя.

4. Установлены:

- закономерность сепарации пыли у поверхности пенного слоя и разделение ее на зоны с различным механизмом взаимодействия в зависимости от кинетической энергии частиц, а также аналитические зависимости скорости и координаты осаждения пылинок на поверхность пенной завесы в зонах инерционного и турбулентного взаимодействия;

- эффективность улавливания пыли в этих зонах;
- оценочные энергетические показатели работы системы обеспыливания.

5. Установлена закономерность и получена математическая зависимость ускорения осаждения частиц на поверхность пены от величины естественного электрического заряда газожидкостной среды и ее формы.

6. Разработан способ и установка контроля кратности пены в динамических условиях.

Научное значение работы состоит в разработке теоретических основ механизма взаимодействия пылевого аэрозоля с пеной с учетом их физико-химических свойств и процессов, происходящих в газожидкостной среде; в установлении закономерности влияния шероховатой поверхности пены на эффективность пылеулавливания как функции размера пузырей пены и частицы пыли; характера влияния армирования пенного слоя на обеспечение сплошности, жесткости пенной завесы. В обосновании новых принципов подхода обеспыливания с использованием динамических процессов взаимодействия пыли с пеной и бесконтактного метода контроля кратности пены, позволяющих разработать новый способ борьбы с пылью, инженерные решения и методики расчета.

Практическое значение результатов работы заключается в том, что проведенные комплексные исследования позволили разработать и реализовать методики расчета обеспыливания пеной на предприятиях различных отраслей народного хозяйства и проектных организаций; методику расчета газоструйных аппаратов для получения пены и насадочных устройств, формирующие геометрические параметры пенной завесы; инженерные решения по созданию новых технологических схем обеспыливания; конструктивные решения системы получения, подачи газожидкостной среды к источнику пылеобразования, устройств дозирования раствора пенообразова-

теля и контроля кратности пены в динамических условиях; техническую документацию по обеспыливанию пеной; схемы автоматизации системы обеспыливания; рекомендации по выбору способа обеспыливания пеной для конкретных производственных условий.

Реализация работы. Научные результаты работы использованы в рамках договорных и тематических работ с промышленностью и проектировании в ряде проектных организаций. Результаты исследований нашли отражение в монографии: "Инженерные решения комплексного метода борьбы с пылью на основе газожидкостной среды и аспирации", в методическом пособии "Пена как средство борьбы с пылью"; рекомендациях по обеспыливанию технологического оборудования литейного производства; использованы кафедрой жизнедеятельности ДИСИ в курсах лекций по охране труда и окружающей среды. Внедрены на 23 предприятиях и организаций в различных отраслях народного хозяйства.

Апробация работы. Основные положения и результаты, полученные в диссертационной работе докладывались и получили одобрение: на Всесоюзной научно-технической конференции "Пены, их получение и применение" (г. Москва, 1974 г.); на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы теплогазоснабжения и вентиляции в условиях климата Восточной Сибири" (г. Иркутск, 1980 г.); Всесоюзном научно-техническом симпозиуме "Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов" (г. Ленинград, 1983 г.); семинаре "Охрана труда и противопожарная профилактика на стадии проектирования и при строительстве объектов народного хозяйства" (г. Ленинград, 1984 г.); Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы охраны труда в промышленности" (г. Севастополь, 1986 г.); Всесоюзной конференции "Актуальные вопросы физико-аэродисперсных систем" (г. Одесса, 1986, 1989 гг.), Всесоюзных научно-технических конференций по борьбе с пылью (г. Ростов-на-Дону, 1985, 1988, 1989, 1991 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 54 научные работы (в том числе 1 монография), 31 авторское свидетельство и положительных решений об их выдаче, 4 статьи переведены и опубликованы в США.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения, изложенных на 294 страницах маши-

нописного текста, содержит 85 рисунков и 16 таблиц, библиографический список из 385 наименований и приложений, изложенных на 36 страницах.

Автор выражает глубокую благодарность проф. Г. Н. Крикунову за научные консультации и методическую помощь при работе над диссертацией, а также благодарит сотрудников кафедры охраны труда Днепропетровского инженерно-строительного института за помощь в проведении исследований и внедрении результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Состояние проблемы, цель и задачи исследований

Значительный вклад в решение различных аспектов проблемы борьбы с пылью внесли отечественные и зарубежные ученые: Ф. А. Абрамов, А. С. Вурчаков, Л. В. Вересневич, А. А. Балакирев, Ф. Г. Гагауа, Г. С. Гродель, С. С. Духин, Б. В. Дерягин, В. П. Журавлев, А. Д. Зимон, И. Г. Ищук, В. М. Кривожижа, П. А. Коузов, Л. М. Левин, И. А. Нельсон, Е. И. Онтин, В. И. Орбаченко, А. И. Онищенко, Г. Е. Попов, П. М. Петрухин, Г. А. Поздняков, А. И. Пирумов, Г. А. Теняков, П. Н. Торский, А. Л. Фрумкин, Н. А. Фуко, Х. Грин, В. Лей, *Walter, W., Fuchs, N., Defy, R.*

Обоснована актуальность темы, отражена научная новизна, практическая ценность, изложены основные научные положения, выносимые на защиту, проведен анализ литературных данных по проблеме борьбы с производственной пылью, на базе которого сформулированы цель, задачи и методы комплексных исследований. В результате обзора законченных научно-исследовательских разработок, изобретений, патентов, специальной литературы, тематики научных исследований в области борьбы с пылью, направленных на повышение эффективности существующих и разработку новых способов, сделан вывод о том, что гидроорошение как высокое эффективное средство обеспыливания широко применяется в горнорудной промышленности. Однако в отдельных отраслях народного хозяйства, где не допускается увлажнение материала, применение этого способа практически невозможно. Гидроорошение не всегда дает должный эффект особенно по отношению к тонким фракциям пыли с размером частиц менее 5 мкм. Наиболее эффективным является гидрообеспыливание с использованием пены. Широкое применение этого способа сдерживается из-за отсутствия инженерных решений, базирующихся на исследованиях механизма взаимодействия трехфазной

среды "пыль - воздух - пена", который изучен недостаточно. Существующие работы по пылеподавлению с помощью пены ограничивались в основном экспериментальными исследованиями механизма обеспыливания на основе физической модели пены в виде газового пузырька. В реальных условиях на пылеисточник подается непрерывный поток пены в виде группы слившихся пузырей с дополнительно действующими силами и явлениями, происходящими в ней, таких как:

- а) действие в объеме пены капиллярных, гравитационных и электростатических сил;
- б) наличие динамических усилий, возникающих при разрушении пленок;
- в) способность твердых частиц проникать в слой пены, изменяя при этом форму и нарушая ее сплошность;
- г) деформация пенного слоя от воздействия запыленного воздушного потока;
- д) сложность конфигурации поверхности пенного слоя вызывает в некоторых случаях турбулизацию воздушного потока на ее поверхности;
- е) процесс разрушения пузырьков сопровождается образованием капель жидкости в виде аэрозольного слоя вблизи поверхности пены.

Эти факторы и явления оказывают существенное влияние на механизм взаимодействия пылевых частиц с пеной и эффективность пылеподавления, которые в рассматриваемых работах не учитывались. На основе анализа технико-экономических показателей обеспыливания пеной автор пришел к выводу о возможности совершенствования метода гидрообеспыливания на базе исследований механизма взаимодействия пыли с пеной с использованием физической модели, учитывающей реальные процессы, происходящие в ней.

Научная задача определяется необходимостью разработки теоретических положений метода как самостоятельного способа борьбы с пылью, так и в комплексе с другими средствами обеспыливания и создание на этой основе обоснованных методов расчета.

Для достижения поставленной в работе цели были сформулированы и решены следующие задачи исследований:

1. Провести анализ и обобщение работ по проблеме борьбы с пылью.
2. Исследовать механизм взаимодействия твердых частиц с

воздушно-механической пеной.

3. Исследовать механизм взаимодействия пылевого потока с плоским препятствием в виде пены.

При исследовании взаимодействия пылевых частиц с пеной (первая задача) требовалось установить стадии процесса взаимодействия, определить оптимальную скорость осаждения частиц на поверхность пены без ее разрушения; раскрыть роль расклинивающего давления при взаимодействии с пылевым аэрозолем; определить вид удара пылинки о поверхность пузыря в зависимости от краевого угла смачивания; оценить полную потерю кинетической энергии пылинки в слое пены и энергию, заключенную в объеме пены; дать энергетическую оценку процесса взаимодействия пылевых частиц с пеной. При исследовании механизма взаимодействия пылевого потока с плоским препятствием в виде пенного слоя (вторая задача) необходимо оценить влияние скорости и координаты соударения твердой частицы с поверхностью пены в зонах инерционного и турбулентного осаждения; определить геометрические параметры (длину, ширину, толщину) пенной завесы; оптимальный расход пены; установить эффективность улавливания пыли пенным слоем.

4. Создать типовые технологические схемы пылеподавления с использованием новых конструктивных решений, новые аппараты для получения пены, устройства, формирующие геометрические параметры пенной завесы.

Конечным итогом исследований являлось решение важной народно-хозяйственной проблемы повышения эффективности борьбы с пылью как профессиональной вредностью и вредным фактором охраны окружающей среды.

Механизм взаимодействия пылевых частиц с пеной

Обеспыливание пеной обусловлено специфическими процессами внешнего и внутреннего взаимодействия и преобразования трехфазной среды "пыль - воздух - жидкость". Стадии процесса взаимодействия твердых частиц с пеной зависят от этих взаимосвязанных физико-химических процессов и факторов, которые представляют несомненный теоретический и практический интерес для количественной и качественной оценки. На основании исследований механизма взаимодействия пыли с пеной выделены следующие стадии

механизма обеспыливания:

- сближение частицы пыли с пеной;
- адгезии частицы к поверхности пены с образованием краевого угла смачивания;
- растекание ПАВ по поверхности частицы;
- втягивание пылинки внутрь пленки до водной прослойки пузыря;
- перемещение частицы с поверхности пузыря в канал Плато с последующей их коагуляцией в утолщенных участках горизонтальных сводных пленок и их втягивание внутрь слоя пены.

Выполнены исследования каждой стадии в отдельности и во взаимосвязи, оценен элементарный акт контакта пылинки с поверхностью пузыря пены. Получена математическая зависимость по определению минимальной скорости осаждения частицы на поверхность пузыря без его разрушения.

$$V = \sqrt{\frac{6\sigma\delta}{Rz\rho}}, \quad (I)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения;
 δ - толщина адсорбционной прослойки; R - радиус пузырька;
 ρ - плотность частицы; z - радиус пылинки.

Как следует из формулы (I), величина минимальной скорости осаждения пылевой частицы зависит не только от физико-химических свойств пыли и пены, но и толщины адсорбционного слоя молекул газа. При скорости частицы меньше минимальной, осаждения может не произойти. Поэтому величина минимальной скорости осаждения частицы во многом определяет эффективность обеспыливания и имеет большое практическое значение при разработке инженерных решений. При осаждении пылевых частиц пены имеет место явление удара. В зависимости от скорости движения пылинки, ее размера, массы и физико-химических свойств пены возможны два вида их взаимодействия:

- 1) твердая частица, ударяясь о поверхность пузыря, не разрушает его пленки;
- 2) пылинка разрушает пленку одного или нескольких пузырей.

При рассмотрении первого вида взаимодействия пылевой частицы с пузырем пены учитываются две фазы удара. В течение первой фазы, продолжительность которой обозначим через τ_1 ,

пленка пузыря пены деформируется до тех пор, пока скорость частицы пыли не станет равной нулю $v = 0$. При этом кинетическая энергия частицы пыли переходит в потенциальную энергию деформации пленки пузыря. В течение второй фазы удара, продолжительность которой обозначим через τ_2 , форма пузыря пленки вследствие его упругости восстанавливается. При этом потенциальная энергия деформации пленки переходит в кинетическую энергию движения частицы пыли. Приняв направление внешней нормали за положительное и применяя к первой фазе удара теорему о проекции количества движения, получим

$$mv_1 - m_1 v = \int_{\tau_1}^{\tau_2} N dt \quad (2)$$

$$mv_1 - m_1 v = S_1^0, \quad (3)$$

где v_1 - скорость частицы пыли в конце первой фазы удара;
 $S_1^0 = \int_0^{\tau_1} N dt$ - импульс ударной силы в первой фазе удара.

Учитывая, что $v = 0$, имеем:

$$S_1^0 = mv_1 \quad (4)$$

Для второй фазы удара уравнение будет иметь вид:

$$m u_1 - m v_1 = \int_{\tau_1}^{\tau_2} N dt \quad (5)$$

или

$$m u_1 - m v_1 = S_2, \quad (6)$$

где u_1 - скорость частицы пыли в конце второй фазы удара;
 $S_2 = \int_{\tau_1}^{\tau_2} N dt$ - импульсу ударной силы во второй фазе удара.

Учитывая, что $v_1 = u_1 = 0$, имеем $S = 0$.

Тогда коэффициент восстановления при ударе, равный отношению модулей ударных импульсов за вторую и первую фазы, будет равен:

$$K_B = \frac{S_2}{S_1^0} = \frac{0}{m_1 v_1} = 0 \quad (7)$$

Следовательно, при взаимодействии гидрофильной частицы пыли с

пузырем пены без его разрушения имеет место неупругий удар. При осаждении гидрофобной частицы ($90 < \theta < 180$) с кинетической энергией недостаточной для разрыва пленки пузыря первая фаза удара будет идентична рассмотренной выше. Вторая фаза отличается, так как силы адгезии будут незначительны или вообще отсутствовать, и частица пыли отделится от пленки пузыря. Поэтому в конце второй фазы удара пылевая частица будет иметь скорость u_1 , отличную от нуля и направленную по нормали противоположно скорости u . В конце же первой и в начале второй фазы скорость частицы $v_1 = u = 0$. Тогда импульс ударной силы во второй фазе удара будет:

$$S_2 = \int_{v_1}^{u_1} N dt = mu_1 - m_1 v = mu_1 \quad (8)$$

Коэффициент восстановления равен:

$$K_B = \frac{S_2}{S_1} = \frac{mu_1}{mv} = \frac{u_1}{v} \quad (9)$$

Из уравнения (9) видно, что коэффициент восстановления больше нуля. Следовательно, при взаимодействии гидрофобной частицы пыли с пузырем без его разрушения имеет место упругий удар. Из приведенных аналитических исследований видно, что при осаждении частицы на поверхность пузыря пены без его разрушения, неупругий удар характерен для гидрофильных пылевых частиц. Для частиц, обладающих гидрофобными свойствами, характерен упругий удар. Таким образом, краевой угол определяет не только величину смачивания, но и вид удара пылинки о поверхность пены и является новым параметром при оценке вида удара частицы с пузырем пены. Эффективное пылеулавливание возможно, когда на пути каждой частицы пыли будет слой пены, способный погасить кинетическую энергию ее движения. С учетом сложной структуры газо-жидкостной системы, состоящей из множества пузырей, механизм разрушения слоя пены под воздействием пылевого аэрозоля существенно отличается от гидроорошения. Если при взаимодействии пылевой частицы с каплей жидкости потеря кинетической энергии происходит при ее ударе о поверхность и погружении в нее, то при пенном методе кинетическая энергия аэрозоля расходуется при разрушении каждого пузыря и в каналах Плато. Для определения величины потери кинетической энергии частицы в слое пены в принятой модели

рассмотрены последовательно механические процессы, происходящие в пене. Вначале рассмотрено взаимодействие отдельного пузырька пены и пылинки, которая сталкивается с ним, а затем - прохождение частицы через воздушной слой и жидкостную фазу канала - Плато. Для скоростей пылинок с числом Рейнольдса от 0 до 400, получены математические зависимости потери кинетической энергии E пылинки в слое пены

$$E = 0,74 \sum_{i=1}^n \left[\frac{25 \Delta S (R + 2\delta)}{R} + 2 \left(\frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} \right) \cdot \frac{\pi d^2}{4} \rho_{\text{ж}} R \right] + 0,262 \sum_{j=1}^m \left(\frac{18}{Re_{96}} \frac{\pi d^2}{4} \rho_{\text{ж}} \frac{v_{\text{ж}}^2}{2} \delta_{\text{ж}} \right), \quad (10)$$

где ΔS - прирост поверхности планки; δ - толщина пленки пузыря; $\delta_{\text{ж}}$ - толщина водной прослойки в каналах Плато; $v_{\text{ж}}$ - скорость движения частицы; d - диаметр частицы; $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{ж}}$ - соответственно плотность воздуха и жидкости.

Аналитическая зависимость (10) позволяет обосновать минимальную толщину слоя пены для эффективного улавливания пыли. Без знания этого параметра невозможна разработка новых опособов пылеулавливания.

Известно, что энергия есть наиболее общая характеристика, общая мера видов движения, в том числе молекулярных, атомных, волновых. Она характеризует в этом смысле энергетическое состояние, в котором находится интересующая нас дисперсная система пены. Для элементарного объема пены, энергия, заключенная в ней, состоит из трех слагаемых: энергии, связанной с внешней поверхностью объема пены; энергии газа, заключенной в пузырьках пены, внутренней энергии пены, обусловленной истечением жидкости из пузырьков и каналов Плато и потенциальной энергии пены. Суммируя все виды энергии, получим выражение для энергии, заключенной в элементарном объеме пены

$$E_n = 1dx \left[25 S_{\text{в}} + 8 \pi \sigma R^2 + \left(\frac{\gamma w^2}{2} + \frac{m_{\text{ж}} v^2}{2} \right) \right] + m_{\text{ж}} g x \quad (11)$$

Энергия объема пены с количеством пузырей N и высотой H , длиной и шириной l получается после интегрирования уравнения по x от нуля до N .

Математическое выражение энергии пены через основные параметры принимает вид:

$$E_n = M \left(16\pi \sigma R^2 + \frac{4}{3\kappa} Q_n \rho_{ж} v^2 + Q_n \rho_n g H \right) \quad (12)$$

Здесь: M - коэффициент геометрической компоновки пузырей; $\rho_{ж}, \rho_n$ - плотность раствора пенообразователя и пены; R - радиус пузырька пены; g - ускорение силы тяжести; v - скорость истечения жидкости из межпленочного пространства пузырька пены и каналов Плато; Q_n - объем пены, E_n позволяет оценить эффективность работы любой установки или системы обеспыливания. Данное решение имеет большое научно-прикладное значение при расчете аппаратов для получения пены, подборе способа реализации метода для определенных пылеаэродинамических условий при энергетической оценке физических процессов пенного метода борьбы с пылью, оценке энергии, расходуемой на процесс взаимодействия пылевых частиц с пеной.

Оценка энергии, реализуемой на полезную работу обеспыливания, рассмотрена исходя из предложенной теории механизма взаимодействия пылевых частиц с газожидкостной средой и энергетических параметров, непосредственно влияющих на процесс каждого этапа с учетом всех действующих сил. Значение энергии, расходуемой на процесс взаимодействия имеет вид:

$$E = \left[\frac{\pi R^2 4v^2}{2\kappa} + \left(\frac{2}{3} \pi \frac{\sigma}{H^2} + 4\pi \tau \sigma \cos \theta \delta_{кр} + \frac{(gS)^2}{12zH} \right) + S_m \sigma \cos \theta + \sigma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \pi R + \sigma S + \sigma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) R \right] N \quad (13)$$

Сравнивая расход энергии на процесс взаимодействия с энергией, заключенной в объеме пены, можно получить новый оценочный параметр в виде энергоемкостного показателя, позволяющий установить долю энергии, расходуемой на процесс взаимодействия, относительно полной энергии, заключенной в объеме пены. Использование этого показателя позволяет объективно оценить работу любого способа обеспыливания для различных производственных условий и принятых технологических схем гидрообеспыливания с точки зрения энергетических затрат.

Аналитические исследования механизма взаимодействия
пылевого потока с плоским препятствием в виде пенного
слоя в комплексе с аспирацией

Для решения этого вопроса рассмотрена модульная задача обтекания осесимметричным запыленным воздушным потоком бесконечной плоской пластины, состоящей из пены. Как показывают натурные и экспериментальные наблюдения, в пенном слое в виде завесы можно выделить три характерные зоны:

1. Зона, в которой частицы пыли проходят пенную завесу насквозь, названная условно "прозрачная" зона.
2. Зона, в которой частицы проникают в слой пены, но не достигают ее противоположной стороны - "полупрозрачная" зона.
3. Зона, в которой мелкодисперсная пыль осаждается на поверхность завесы, - абсолютно "непрозрачная" зона.

Наличие таких зон объясняется тем, что при обтекании препятствия в потоке воздуха происходит сепарация частиц. Мелкодисперсные частицы в значительной мере искривляют свои траектории движения под действием потока воздуха, и их соударение с препятствием происходит под острым углом. Обладая при этом сравнительно малой кинетической энергией, они не могут проникнуть в пену на значительное расстояние. Влияние искривления линий тока воздушного потока при обтекании препятствия на частицы крупных размеров оказывается малым, поэтому такие частицы осаждаются практически под прямым углом. Обладая при этом большой кинетической энергией, некоторые из них могут пробить пенный слой насквозь.

Определение размеров характерных зон сводится к решению двух разноплановых задач. Первая - это определение координат точки соударения и скорости в момент соударения (или хотя бы нормальной к поверхности составляющей этой скорости) частицы с поверхностью пены в зависимости от массы частицы и скорости воздушного потока. Это задача аэромеханики двухфазных сред. Вторая задача ближе к задачам гидромеханики, то есть задача определения пути торможения частицы в пене в зависимости от ее кинетической энергии. Для решения первой задачи принимается, что поток воздуха обтекающий завесу - гиперболический. Такой поток характерен при обтекании гладкого препятствия. Но как

отмечалось выше, для "прозрачной" зоны такое предложение допустимо. В случае, когда диаметр воздушного потока значительно меньше размеров пенной завесы можно принять, что поток воздуха вблизи препятствия является гиперболическим. Для гиперболического потока воздуха было составлено уравнение движения частицы, в котором учтено влияние инерционных и аэродинамических сил, имеющее следующий безразмерный вид:

$$\begin{aligned} St \frac{d^2x}{dt^2} + dx/dt + ax &= 0 \\ St \frac{d^2y}{dt^2} + dy/dt - by &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где St - число Стока

$$a = \frac{a \cdot \ell}{U_0}, \quad (a > 0)$$

безразмерные параметры, характеризующие вид потока

$$b = \frac{b \cdot \ell}{U_0}, \quad (b > 0)$$

U_0 - скорость воздушного потока у пылеисточника, м/с; a, b - коэффициенты пропорциональности; ℓ - радиус воздушного потока, м; $U_x = a \cdot x, U_y = b \cdot y$ ($a > 0 > b$) - компоненты скорости воздушного потока.

Определим скорости и координаты частиц, для которых $St \geq 0,25$ а в момент соударения их с завесой. Знать такие скорости нужно для того, чтобы иметь возможность установить путь торможения частицы пыли в пене, с которым связана минимальная толщина завесы. Координаты же точек соударения позволяют определить зону инерционного осаждения частиц на завесе. В этой зоне происходит интенсивное разрушение пузырей воздуха (за счет кинетической энергии частиц) и выброс капель жидкости. Нормальная составляющая скорости частицы пыли в момент соприкосновения ее с поверхностью пенной завесы в зоне инерционного осаждения определяется зависимостью:

$$\begin{aligned} v = \sqrt{\frac{St}{a}} \exp\left\{\frac{1}{2} \left[\ln \frac{a}{St} \left(1 - \frac{1}{St} - \frac{a}{3St}\right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{2}{\sqrt{4St a - 1}} \operatorname{arctg} \frac{2St - 1}{\sqrt{4St a - 1}} + \frac{\pi}{\sqrt{4St a - 1}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что с ростом St , v приближается к единице.

Для определения границы зона осаждения частиц за счет

инерционных сил необходимо знать ее координату соударения с завесой, которая определяется уравнением:

$$y = \frac{M_2}{M_1 - M_2} e^{M_1 t_0} + \frac{M_1}{M_1 - M_2} e^{M_2 t_0}, \quad (16)$$

где M_1, M_2 - корни соответствующих характеристических уравнений; t_0 - время движения частицы от пылеисточника до соударения с пенной завесой.

Длина пенной завесы в зоне турбулентного осаждения частиц имеет вид:

$$L_T = 2,5 \Sigma v \ln \frac{B}{D}, \quad (17)$$

где Σ - время релаксации; v - скорость осаждения частицы на поверхность; B - ширина зоны инерционного осаждения; D - диаметр пузыря.

Определение толщины слоя пенной завесы, необходимой для пылеулавливания, представляет сложную задачу. Для определения пути торможения предложен подход, основанный на теории численных методов. Этот подход учитывает реальную структуру пены, состоящей из пузырьков воздуха и жидкости, и случайные возмущения траектории движения частицы при пробое ею одного пузырька

$$H = \frac{K(17d^3 \rho v^2 + d\sigma \cos \theta) \sin d}{0,75V + 0,03(N_{vt} + N_{\mu})V} \quad (18)$$

Здесь: H - толщина слоя пены; d - угол осаждения частицы; σ - коэффициент поверхностного натяжения;

K - кратность пены; d - диаметр частицы; v - скорость частицы; ρ - плотность частицы; N_{vt}, N_{μ} - динамическая вязкость жидкости и воздуха; θ - краевой угол смачивания.

Из выражения (18) следует, что толщина слоя зависит от физико-химических свойств пыли и пены. Кинетическая энергия пыли, обусловленная дисперсностью и плотностью пыли, и ее смачиваемость определяют толщину слоя пены. Следовательно, при улавливании пыли пенной завесой расход пены на обеспыливание определяется, в основном, не концентрацией, а дисперсностью пыли. Поэтому для условий производства, где преобладают в составе тонкодисперсная пыль, пенная завеса имеет толщину

значительно меньше нежели при крупнодисперсной пыли. Пузыри пены должны быть крупными (3-10 мм). Применение пенной завесы позволяет более эффективно управлять процессом обеспыливания за счет изменения структурно-механических свойств пены в зависимости от конкретных исходных данных. Степень снижения содержания пыли в воздухе рабочей зоны, уменьшения пылевой нагрузки на аспирационную систему и пылеулавливающие устройства во многом зависят от оптимального расхода газожидкостной среды, так как в процессе пылеулавливания возможен и перерасход пены, и недостаточная подача ее. В первом случае возможно переувлажнение материала, во втором - увеличивается пылевая нагрузка на вентиляционную систему и выбивание ее в воздушную среду производственных помещений.

Исходя из принципа динамического равновесия процесса подачи пены и ее разрушения при взаимодействии с пылевым аэрозолем, оптимальный расход пены определяется из выражения:

$$G_n = \frac{1}{2} B H V, \quad (19)$$

где B - ширина пенной завесы; H - толщина пенной завесы; V - скорость осаждения частицы.

Общая эффективность улавливания пыли пенной завесой под воздействием нескольких факторов одновременно выражается зависимостью

$$\eta = [1 - (1 - \eta_a)(1 - \eta_u)(1 - \eta_t)] 100\%, \quad (20)$$

где η_a - эффективность улавливания пыли в зоне аэрозольного облака капель жидкости, образующихся в результате разрушения пузырей пены; η_u - эффективность улавливания в зоне инерционного осаждения крупнодисперсной пыли; η_t - эффективность улавливания пыли пенной завесой в зоне турбулентного осаждения мелкодисперсной пыли.

Может определяться из математического выражения

$$\eta_a = 1 - \exp\left[\frac{K_k P_a}{V_B} + 1 - \exp\left(\frac{V_k R_a}{h V}\right)\right], \quad (21)$$

где K_k - коэффициент коагуляции частиц; V_k - скорость осаждения капель в потоке; V_B - скорость потока; h - высо-

та слоя аэрозольного облака каплей жидкости; ρ_1 - плотность аэрозольного облака каплей; R_3 - радиус пенной завесы в зоне инерционного осаждения пыли.

Эффективность улавливания пыли в зоне инерционного осаждения равна:

$$\eta_u = 1 - \exp(-HS), \quad (22)$$

где H - толщина слоя пенной завесы; S - площадь поверхности зоны инерционного осаждения пыли.

Эффективность пылеулавливания в зоне турбулентного осаждения имеет вид

$$\eta_T = \frac{VB(\ln R_3 - \ln R_T)}{4K(2 + \sqrt{1 + B^2})}, \quad (23)$$

где V - скорость частицы; R_3 - радиус пенной завесы; R_T - радиус зоны турбулентного осаждения частиц;

K - кратность пены; B - ширина пенной завесы.

Из выражений (20) - (23) следует, что эффективность обеспыливания зависит от геометрических параметров пенного слоя. Длина пенной завесы определяется зонами инерционного и турбулентного осаждения частиц пыли:

$$L_3 = 2(L_u^2 + L_T^2) \quad (24)$$

Исходя из конструктивных особенностей аспирационных устройств, возможны два случая обтекания завесы пылевым потоком. В первом случае имеется свободное обтекание завесы. Ширина завесы принимается равной величине ее длины. Во втором случае обтекания ширина завесы ограничена параметрами укрытия и равна длине завесы, то есть $B_3 = B_4$.

Таким образом, теоретические исследования взаимодействия вылевого потока с плоским препятствием в виде пенного слоя позволили перейти к разработке нового способа улавливания пыли армированной пенной завесой, обосновать ее геометрические параметры (длина, ширина, толщина), оценить эффективность улавливания пыли.

Исследование естественной электризации газожидкостной
среды и разработка способов измерения кратности пены
в динамических условиях

Экспериментально установлено, что естественная электро-заряженность пенного аэрозоля значительно превышает степень электризации водного аэрозоля. В связи с этим представляет большой научно-прикладной интерес исследование естественного электрического заряда пены - механизма его образования, величины и знака заряда в зависимости от физико-химических свойств ПАВ и пены. Исследования выполнены для двух видов электроизмерительных ячеек - одноэлектродные и двухэлектродные. Измерение заряда в пене проводилось на экспериментальной установке, включающей вольтметр-электромметр ВГ-30/3 и цифровой вольтметр В7-16. Цифровой сигнал с АЦП поступает на интерфейс и затем специализированное управляющее вычислительное устройство "Электроника ДЗ-28". Цифровая информация регистрировалась печатающим устройством "Консул 254".

Установлено, что электрочаргд пены в пеногенераторе происходит в два этапа: 1 - при прохождении раствора пенообразования по трубопроводам и каналам распылителя аппарата; 2 - за счет флуктуации концентрации ионов в пенообразующей жидкости; трибоэлектрических явлений на границе фаз стенки пакета сеток, а также за счет осаждения газовых ионов сжатого воздуха на внутренней поверхности пленки пузыря.

Как показали результаты исследований естественного заряда пены (при пересчете на жидкость) ее порядок превышает порядок суммарного заряда жидкости, полученной за счет естественной электризации $g_n \gg g_k$. В результате исследований получены математические зависимости для оценки влияния электрических сил пены на движение пылинки (ускорение). Эти зависимости установлены соответственно для газожидкостной среды, имеющей форму слоя в виде завесы a_1 ; для цилиндрического потока a_2 и подачи пены в виде шара a_3 :

$$a_1 = \frac{pH}{2880} \cdot \frac{3e}{4\pi r_0^2 \rho_{пл} m} \quad (25)$$

$$a_2 = \frac{\sigma}{2 \epsilon \epsilon_0} \cdot \frac{3e}{4 \pi z_0^2 \epsilon_m \rho_n} \left(1 - \frac{z}{R} + \frac{z^3}{2R^3} \right); \quad (26)$$

$$a_3 = \frac{\rho R z^3}{6 \epsilon_0 z^2} \cdot \frac{e}{4 \pi z_0^2 \epsilon_m \rho_n} \quad (27)$$

Здесь: ϵ - диэлектрическая проницаемость окружающей среды; ϵ_0 - электрическая постоянная; ρ - плотность заряда пены; H - толщина слоя пены; e - элементарный заряд пылинки, кл; z - расстояние от пылинки до поверхности пены; z_0 - радиус пылинки; m - масса; ρ_n - плотность пылинки.

Как видно из формул (25) - (27) ускорение частицы пыли для всех случаев растет с уменьшением ее радиуса по квадратичному закону. Это означает, что влияние электрических сил особенно усилено сказывается на захвате мелкодисперсной пыли.

Учитывая невозможность применения объемного метода для измерения кратности пены в динамических условиях, нами разработан принципиально новый бесконтактный метод, основанный на измерении добротности ячейки, через которую проходит поток пены, позволяющий снизить трудоемкость отбора проб и повысить качество измерений.

При введении в измерительную индуктивную ячейку проводящей среды (пены), потери энергии в колебательном контуре увеличиваются пропорционально ее проводимости (в данном случае - пропорционально количеству жидкой фазы пены). С увеличением потерь энергии уменьшается добротность колебательного контура, что проявляется как снижение напряжения на измерительном конденсаторе.

Установки содержат эталонный генератор, сумматор, на первый вход которого подается напряжение с измерительного конденсатора, а на второй - через аттенуатор в противофазе напряжение с конденсатора эталонного колебательного контура. Следовательно, на вход вольтметра поступает сигнал, пропорциональный градиенту измерения добротности, то есть пропорциональный кратности пены. Установка защищена авторским свидетельством.

В результате исследований был изучен процесс естественной электризации пены в зависимости от ее физико-химических свойств. С учетом механизма образования естественного заряда пены получена математическая зависимость ускорения осаждения пылинки на поверхность пены от заряда и формы препятствия, установлена зако-

номерность ускорения осаждения частицы на поверхность пенного слоя в зависимости от дисперсности пыли и формы обтекаемого препятствия, разработаны способ и установка для контроля кратности пены в динамических условиях.

Лабораторные исследования улавливания пыли пенной завесой в комплексе с аспирацией

Исследования выполнены с целью установления оптимальных геометрических параметров пенной завесы как вида плоского препятствия с шероховатой поверхностью в зависимости от структурно-механических свойств газожидкостной среды для конкретно заданных пыле-аэродинамических условий и сравнения их с результатами теоретических исследований. Исследовано влияние воздушного потока на деформацию пенной завесы с армированием завесы и без армирования при различной толщине слоя пены и кратности 250 и 500 о.е. Получены эмпирические зависимости оптимальной толщины пенной завесы от скорости воздушного потока. Установлено, что армирование пенной завесы позволяет увеличить скорости воздушного потока в 1,5 - 2 раза. Экспериментально получены функциональные зависимости образования плотности аэрозольного облака капель в результате разрушения пузырей пены при взаимодействии с запыленным воздушным потоком, из которых следует, что количество капель зависит от расстояния до поверхности пенной завесы.

Полученные эмпирические зависимости имеют вид:

- зависимость величин H , R_u , R_T от скорости пылевоздушного потока

$$H = 4,18212 + 3,6372 \ln V \quad (28)$$

коэффициент корреляции $R_o = 0,9798$;

$$R_u = 22,889 - 6,1666 V \quad (29)$$

коэффициент корреляции $R_o = 0,9952$;

$$R_T = 20,49973 + 0,999382V + 1,336V^2 \quad (30)$$

коэффициент корреляции $R_o = 0,968$

Зависимость H от кратности пены

$$H = -14,9 + 0,147K - 0,00038K^2 + 0,000001K^3 \quad (31)$$

коэффициент корреляции $R_0 = 0,889$.

Сравнение результатов лабораторных и теоретических исследований изменения толщины слоя пены в зависимости от кратности пены, скорости пылевого аэрозоля и кинетической энергии частиц показало, что величина расхождения находится в пределах 10 %. Толщина слоя пены определяется во многом не только кинетической энергией пылевого потока, но и существенно зависит от смачивающих свойств пыли. Так, например, для пыли плотностью $\rho_p = 1012 \text{ кг/м}^3$ и при изменении скорости от 0,5–1,5 м/с толщина слоя разрушения пены увеличивается на 2–3 см, а при изменении угла смачивания в пределах от 5 до 45° толщина изменяется на 2–5 см, то есть эффект смачивания для разрушения пены за счет смачивающих свойств может значительно превосходить таковой за счет кинетической энергией пылевого аэрозоля. Поэтому при экранировании, когда поверхность пены контактирует с материалом, расход пены на 25–30 % больше расхода пены, чем при пылеулавливании. Как показали результаты лабораторных исследований, размер зон инерционного и турбулентного осаждения пылевого аэрозоля на пенную завесу зависит от кинетической энергии частиц. Так, радиус зоны инерционного осаждения уменьшается с ростом скорости пылевого аэрозоля, а радиус зоны турбулентного осаждения с ростом скорости частиц возрастает. Сходимость теоретических и лабораторных результатов находится в пределах 7 %. Изменение кратности пены на величину R_L и R_T практически не влияет. Экспериментально подтверждено наличие зон инерционного и турбулентного осаждения частиц на поверхности пенной завесы. Эффективность пылеулавливания составляет 99,8–99,9 %. Пылевая нагрузка на вентиляционную систему может быть снижена до 70 %.

Разработка инженерных решений обеспыливания пенной в комплексе с аспирацией

Для практической реализации в промышленности результатов комплексных исследований по созданию нового способа борьбы с пылью требовалось разработать новые и усовершенствовать существующие аппараты для получения высокочастотной пены. Поэтому нами была поставлена задача разработать газоструйные пеногенераторы, имеющие незначительные габариты, удобные в эксплуатации, несложные в изготовлении, использующие давление воздуха до 9,8·10⁵ Па.

Ключевыми вопросами при исследовании гидроаэродинамики газоструйного пеногенератора было установление физических характеристик аппарата и энергетической оценки его работы. Конструктивно газоструйный пеногенератор отличается от существующих простой конструкцией распылителя с центральным (осевым) подводом раствора пенообразователя. В пеногенераторах данной конструкции начальная стадия - распыления пенообразующей жидкостью осуществляется в результате удара 2-х потоков (воздушного и жидкого), выходящих в одном направлении из распылителя. Энергетика потока этого гидрогазодинамического процесса связана с их массовыми расходами. Для характеристики развития данного процесса целесообразно использовать понятие о "стехиометрическом соотношении массовых расходов", соответствующем заданным значениям кратности пены. В результате проведенных исследований установлена зависимость диаметра капли жидкости от размера ячейки сетки (пакета)

$$d_k = \sigma \sqrt{2} \quad (32)$$

Средняя скорость гидроаэродинамического потока в системе пеногенератора рассчитывается по закону удара неупругих тел

$$V_{cm} = \frac{\varphi_{стех} \cdot V_{ар} + V_{жк}}{1 + \varphi_{стех}} \quad (33)$$

где: $\varphi_{стех}$ - коэффициент стехиометрического соотношения; $V_{ар}$ - скорость истечения воздуха из распылителя пеногенератора; $V_{жк}$ - скорость истечения раствора пенообразователя и распылителя.

Средняя скорость истечения пены из пеногенератора определяется из уравнения Бернулли (на срезе ствола пеногенератора)

$$V_n = \varphi \sqrt{\frac{2(P_{г.см} + P_{ст.см})}{\rho_{см}}} \quad (34)$$

где φ - коэффициент скорости истечения пены из пеногенератора; $P_{г.см}$, $P_{ст.см}$ - динамическое и статическое давление смеси в корпусе пеногенератора; $\rho_{см}$ - плотность смеси "жидкость-воздух".

Энергетический баланс работы пеногенератора проведен на 1 кг пенообразующей жидкости с соблюдением закона сохранения энергии. Необходимый запас энергии воздушного потока перед входом в распылитель имеет вид

$$E = E_k + E_n + E_p + E_{y\delta} \quad (35)$$

Здесь: E_k - кинетическая энергия смеси "жидкость-воздух"; E_n - потенциальная энергия смеси; $E_{y\delta}$ - потери энергии на удар потоков воздуха и жидкости; E_p - энергия потока воздуха для создания разрежения.

Подставив значение составляющих, получим:

$$E = \frac{(1 + \varphi_{смex}) V_{см}}{2} + \rho_{ж} g (1 + \varphi_{смex}) \rho_{с.см} + \frac{V_{ж}^2}{2} + \frac{\rho_{в} V_{в}^2}{2} \quad (36)$$

Энергоемкостный показатель E_3 работы аппарата, физическая суть которого есть отношение энергии, заключенной в объеме пены, E_n к энергии, затраченной на ее получение $E_{зат}$. $E_3 = \frac{E_n}{E_{зат}}$ определяется зависимостью:

$$E_3 = \frac{M(16\sigma GR^2 + \frac{4}{3}R Q_a \rho_{ж} V^2 + Q_a \rho_{в} g H)}{(1 + \varphi_{смex}) V_{см} + \rho_{ж} g (1 + \varphi_{смex}) \rho_{с.см} + \frac{V_{ж}^2}{2} + \frac{\rho_{в} V_{в}^2}{2}} \quad (37)$$

Этот показатель дает возможность оценить, какая часть энергии, затраченной на получение пены в пеногенераторе, переходит в энергию, заключенную в рабочей среде. Чем выше этот показатель, тем экономичнее система обеспыливания пеной.

Инженерные решения

По результатам исследований разработаны и внедрены инженерные решения, включающие:

- методику расчета газоструйных пеногенераторов;
- методику расчета способа улавливания пыли армированной пенной завесой;
- новые конструкции пеногенераторов;
- насадочные устройства, формирующие геометрические параметры пенной завесы;
- типовые технологические схемы обеспыливания пеной в комплексе с аспирацией на участках пересыпки, ссыпки, выгрузки сыпучего материала из бункера на конвейерную ленту, с ленты

на ленту, с ленты в элеватор, бункер;

- типовые технологические схемы пылеподавления пеной на выбивных решетках литейного производства.

Разработаны:

- двухступенчатая установка по очистке вентиляционного воздуха и дымовых газов от полидисперсной пыли производительностью до 20 000 м³/ч;

- дозирующие устройства раствора пенообразователя;

- система автоматики, телемеханики и ЭВМ для управления процессом обеспыливания, классификация использования пены как средства борьбы с пылью по техническим, санитарным и экономическим классам.

Представлены результаты внедрения метода, эффективность которых на рабочих местах участков выбивной решетки, выгрузки, ссыпки, пересыпки сыпучих материалов характеризуется снижением содержания пыли с 47-63 мг/м³ до общего фона запыленности воздушной среды цеха (2-5 мг/м³) (ДЗМО, завод "Прессов", ДРСУ-60, г. Днепропетровск и 20 предприятий и организаций различных отраслей народного хозяйства.)

Наряду с обеспечением социального эффекта, выражающегося в улучшении условий труда и снижении опасности заболеваний пневмокониозом, разработанный метод и технические средства его реализации по обеспыливанию пеной по сравнению с гидрооросением обеспечивают экономию пенообразователя и энергии на 10-12%. Расход воды сокращается в 4-5 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований и прикладных работ по их внедрению в народное хозяйство осуществлено теоретическое обобщение и решена важная, имеющая социальное и народнохозяйственное значение проблема по дальнейшему развитию теоретических основ, разработке и апробации способов борьбы с пылью на основе газокидкостной среды и аспирации, обеспечивающая улучшение санитарно-гигиенических условий труда, сокращения заболеваний пневмокониозом при существенном сокращении расхода поверхностно-активных веществ, электроэнергии и особенно воды.

Основные научные результаты, выводы и практические рекомендации выполненной работы:

1. На основе единой физической модели пены с учетом последних достижений в области структурно-механических свойств пленок и пен, закономерной гидро-аэромеханики обтекания твердых тел исследован механизм взаимодействия трехфазной среды "пыль-газ-пена", на базе которого построена математическая модель взаимодействия пылевого потока с пеной, дано его аналитическое описание, разработан новый способ обеспыливания, технические средства его реализации, а также методики расчета эффективности процесса пылеулавливания.

2. В соответствии с принятой математической моделью предложен механизм взаимодействия твердых частиц с пеной, учитывающей физико-химические свойства пены и газожидкостной среды и дано аналитическое описание зависимости минимальной скорости осаждения частицы твердого тела на поверхности пены, полной потери кинетической энергии пылинки в слое пены, раскрыта роль раскливающего давления при взаимодействии пыли с пеной, дана энергетическая оценка процесса обеспыливания, предложен и обоснован энергоемкостный показатель работы системы пылеподавления.

3. Раскрыт и изучен механизм взаимодействия пылевого потока со слоем пены как плоским препятствием с шероховатой поверхностью, на основании чего получены аналитические зависимости скорости и координаты частиц пыли при соударении с пеной, геометрических параметров пенного слоя, эффективности улавливания пыли пенным слоем, а также дана качественная и количественная характеристики критерия Стокса при обтекании препятствий в виде слоя пены. На основании этих исследований предложен новый способ улавливания пыли армированной пенной завесой.

4. Разработаны теоретические основы и инженерная методика расчета параметров армированной пенной завесы для улавливания пыли различного дисперсного состава, установлена зональность пенной завесы, исследован процесс пылеулавливания в различных зонах, дана оценка процесса пылеулавливания в зонах: аэрозольного облака капель жидкости, инерционного осаждения крупнодисперсной пыли, турбулентного осаждения мелкодисперсной пыли, а также общей эффективности улавливания пыли армированной пенной завесой.

Применение армированной пенной завесы позволяет снизить

расход раствора пенообразователя до 70 %, обеспечивает возможность управления процессом обеспыливания с учетом физико-химических свойств пыли и газожидкостной среды, допускает повышенные скорости подачи запыленного воздуха на поверхность пенной завесы в 1,6 - 2 раза. Достоинства армированной пенной завесы позволит существенно расширить границы применения пены как средства борьбы с пылью.

5. Раскрыт механизм и экспериментально изучен вопрос естественной электризации пены в зависимости от ее физико-химических свойств. С учетом механизма образования естественного заряда пены получены аналитические зависимости ускорения осаждения пылинки на поверхность пены от заряда и формы препятствия, закономерности ускорения осаждения частицы на поверхность пенного слоя как функции дисперсности пыли и формы обтекаемого препятствия; разработаны способ и установка для контроля кратности пены в динамических условиях, позволяющие снизить трудоемкость, время отбора проб и повысить качество измерений. На основе измерений доказано, что естественный заряд пены существенно превышает естественный заряд жидкости, из которой она получена.

6. На основе комплекса экспериментальных исследований установлены зависимости геометрических параметров пенного слоя от физико-химических свойств пыли и газожидкостной среды, подтвердившие с погрешностью до 10 % результаты теоретических исследований, изучены процессы образования слоя капель в результате разрушения пузырей пены при взаимодействии с пылью, а также влияние воздушного потока на деформацию пенного слоя.

7. В результате проведения комплекса теоретических, экспериментальных исследований и работ по новой технике получены физические характеристики пенообразования, дана энергетическая оценка работы пеногенераторов, разработан новый способ улавливания пыли армированной пенной завесой, новые конструкции распылителя для пеногенераторов, насадочные устройства, формирующие геометрические параметры пенной завесы, методики их расчета, позволяющие повысить эффективность обеспыливания пенной и расширить границы внедрения гидросебпыливания.

8. Научные положения, инженерные методики, новый способ пылеулавливания и технические средства его реализации исполь-

зованы на 23 предприятиях и организациях строительной, металлургической и горной промышленности.

Новизна и оригинальность разработок отражены в монографии, опубликованных в отечественной научно-технической печати 54 статья и публикациях в США и защищены 31 авторскими свидетельствами и положительными решениями об их выдаче.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.М.Солодовников, В.З.Маруфленко. Обеспыливание воздуха пеной. - Ж. Литейное производство. 1972. - № 7. - 16 с.

2. А.М.Солодовников, Ф.А.Абрамов. Пенообразователи для борьбы с пылью в литейных цехах. - Ж. Литейное производство. 1973. - № 3. - С. 39-40.

3. А.М.Солодовников, Н.Л.Фролов. Обеспыливание воздуха в литейных цехах с помощью воздушно-механической пены. - Ж. Гигиена труда и профзаболевания. 1973. - № 9. - С. 49-50.

4. А.М.Солодовников, Н.Л.Фролов. Подавление пыли в литейных цехах. - Ж. Охрана труда и страхование, 1973. - № 10. - 23 с.

5. А.М.Солодовников. Пена как средство борьбы с пылью в литейных цехах. - Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Пены, получение и применение. М., 1974. - 58 с.

6. А.М.Солодовников. Цилиндрический пеногенератор и методика его расчета. - Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Пены, получение и применение. М., 1974. - С. 3-8.

7. А.М.Солодовников, Ф.А.Абрамов. Разработка и исследование состава пенообразователя для применения в угольных шахтах - Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Пены, получение и применение. М., 1974. - С. 42-44.

8. А.М.Солодовников, Л.Н.Роменский. Цилиндрический пеногенератор. - Известия вузов и Горный журнал. 1973. - № 10. - С. 131 - 137.

9. А.М.Солодовников. Пеногенератор для борьбы с пылью. - Ж. Литейное производство. 1974. - № 6. - С. 36-37.

10. А.М.Солодовников, Л.Н.Роменский. Цилиндрический генератор воздушно-механической пены. - Ж. Безопасность труда в промышленности. 1974. - № 4. - С. 59-60.

11. А.М.Солодовников, Л.Н.Роменский. Методика расчета плоского пеногенератора. Ж. Уголь Украины. 1974. - № 4. - С.32-34.

12. А.М.Солодовников. Определение оптимального количества пены, необходимого для пылеподавления. - Ж. Литейное производство, 1975. - № 6. - С. 51-52.

13. А.М.Солодовников, Л.Н.Роменский. Пена как средство борьбы с пылью. - Монография, гл. У. Киев, Наукова думка, 1976. - 161 с.

14. А.М.Солодовников. Обмыливание пенообразователем. - Ж. Городское хозяйство Украины, 1978. - № 3. - 16 с.

15. А.М.Солодовников, Л.А.Чередниченко. О механизме взаимодействия пены с частицами пыли при гидрообеспыливании. - Сб. тр. Проблемы теплоснабжения и вентиляции в условиях климата Восточной Сибири, Иркутск, 1980. - С. 61-65.

16. А.М.Солодовников. Методические указания для слушателей ФПК охраны труда. Борьба с пылью. - г.Днепропетровск, типография. 1982. - 32 с.

17. А.М.Солодовников, Л.А.Чередниченко. Особенности процесса взаимодействия пылевых частиц с пеной. - Сб. Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов, г.Кохтла-Ярве, 1983. - С. 46-47.

18. А.М.Солодовников, Н.Ф.Фесенко. Влияние скорости пылевых частиц при взаимодействии их с пеной. - Сб. Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов, г.Кохтла-Ярве, 1983. - С. 47-48.

19. А.М.Солодовников, Н.Ф.Фесенко. Влияние скорости пылевых частиц при взаимодействии с пеной. - Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов, г.Кохтла-Ярве. - С. 48-49.

20. А.М.Солодовников. Средство пылеподавления пеной на выбивной решетке. - Ж. Литейное производство, 1984. - № 6. - С. 28-29.

21. А.М.Солодовников. Оценка экономического эффекта внедрения пенного метода борьбы с пылью в литейном производстве. - С-ка деп. № 3899-83, 1983.

22. А.М.Солодовников, В.В.Сафонов. Пена как средство борьбы с пылью и шумом в литейных цехах на выбивной решетке. - Ж. Безопасность труда в промышленности, 1984. - № 8. - 52 с.

23. А.М.Солодовников. Классификация применения пенного метода борьбы с пылью. - Методическое пособие, г. Днепропетровск. Типография, 1985. - 36 с.

24. А.М.Солодовников, Н.Ф.Фесенко. Пенные аэрозоли в борьбе с пылью. - Тезисы докладов XIV Всесоюзной конференции "Актуальные вопросы физики и электродинамических систем", г. Одесса, ОГУ, 1986.

25. Г.Н.Крикунов, А.М.Солодовников, В.И.Басий. Инерционное улавливание пыли пенной завесой. - Сб. "Охрана труда и противопожарные мероприятия на стадии проектирования и при строительстве объектов народного хозяйства", г. Ленинград, 1984. - С. 49 - 52.

26. А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов. Влияние электрического поля на процесс осаждения пылевых частиц: Межвузовский сб. "Системы обеспыливания в строительстве", г. Ростов-на-Дону, 1985. - С.3-4.

27. А.М.Солодовников. О потере кинетической энергии пылевых частиц в слое пены: Межвузовский сб. "Экономия материальных и энергетических ресурсов в системах отопления и вентиляции", г.Ростов-на-Дону, 1985. - С. 101-103.

28. А.М.Солодовников. Физическая модель взаимодействия пылевого потока с пенной завесой: Межвузовский сб. "Обеспыливание в строительстве", г.Ростов-на-Дону, 1987. - С. 100-104.

29. А.М.Солодовников. Энергия, затраченная пылевой частицей на разрушение пленки пузырька: Межвузовский сб. "Теплоснабжение и вентиляция аграрно-промышленного комплекса", г.Ростов-на-Дону, 1989. - С. 41-43.

30. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Борьба с пылевыми выбросами на асфальто-смесительной установке. - Сб. - "Актуальные вопросы физики аэродинамических систем", г. Одесса, 1989. - 130 с.

31. Солодовников. Инженерные решения пенного метода борьбы с пылью. - Ж. Безопасность труда в промышленности, 1989. - № 7. - 81 с.

32. А.М.Солодовников, А.С.Беликов, С.Н.Станкевич. Система управления очисткой воздуха. - Ж. Безопасность труда в промышленности", 1988. - № 12. - 47 с.

33. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Дозирующие устройства для пенного метода борьбы с пылью. - Ж. Литейное производство, 1990. - № 5. - 23 с.

34. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Применение пенного

метода для борьбы с пылью. - Ж. Литейное производство, 1989. - № 1.

35. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Борьба с пылевыми выбросами на асфальто-смесительных установках. - Сб. тезисов статей "Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем", 2 часть, ОГУ, 1989.

36. А.М.Солодовников, А.С.Беликов, С.Н.Станкевич. Новые разработки в области использования пенного метода борьбы с пылью. - Ж. Литейное производство, 1988. - № 4. - 22 с.

37. А.М.Солодовников, А.В.Линьков, С.Н.Станкевич. Пылеулавливание армированной пенной завесой. - Сб. "Металлургическая промышленность и горнорудная промышленность", 1988. - № 1. - 76 с.

38. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Технологические схемы пылеулавливания пеной в комплексе с аспирацией. - Ж. Безопасность труда в промышленности, 1990. - № 1. - С: 33-34.

39. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Методы борьбы с пылью: недостатки и достоинства. - Ж. Безопасность труда в промышленности, 1989. - № 8. - 46 с.

40. А.М.Солодовников, А.С.Беликов, С.Н.Станкевич. Автоматизация системы очистки воздуха пенным аэрозолем. - Ж. Безопасность труда в промышленности, 1989. - № 8. - 32 с.

41. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Комплексный метод борьбы с пылью. - Ж. Литейное производство, 1990. - № 5.

42. А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов. Механизм разрушения слоя пены под воздействием движущейся твердой частицы. - Сб. научных трудов "Пути совершенствования выбросов", г.Пенза, 1984.

43. А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, В.И.Васий. Экспериментальные исследования электроразряда пены. - Сб. "Пути совершенствования выбросов", г.Пенза, 1984. - С. 81-82.

44. А.М.Солодовников. Новые конструкции насадок. - Ж. Охрана труда и социальное страхование, 1983. - № 3. - 36 с.

45. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Пылеулавливание электроразряженной газожидкостной средой. - Ж. Безопасность труда в промышленности, 1992. - № 3. - 37 с.

46. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Ресурсосберегающий метод борьбы с пылью. - Ж. Безопасность труда в промышленности, 1991. - № 4. - С. 41-42.

47. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Технологические схемы пылеулавливания пеной в комплексе с аспирацией. - Ж. Безопасность труда в промышленности, 1990. - № 1. - С. 33-34.

48. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Новые конструкции пылеулавливающих устройств. - Ж. Безопасность труда в промышленности, 1991. - № 2. - С. 20-23.

49. А.М.Солодовников. Основы комплексного метода борьбы с пылью с использованием газожидкостной среды и аспирации. Сборник трудов Всесоюзной научно-технической конференции по борьбе с пылью, г.Ростов-на-Дону, 1991. - С. 77-89.

50. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Новые конструкции пылеулавливающих устройств. - Ж. Литейное производство, 1991. - № 12. - С. 20-22.

51. А.М.Солодовников. Инженерные решения комплексного метода борьбы с пылью на основе газожидкостной среды и аспирации, г.Днепропетровск, "СИЧ", 1991. - С. 3-62.

52. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Генератор пенного аэрозоля для борьбы с пылью. - Ж. Безопасность труда в промышленности", 1991.

53. А.М.Солодовников, С.Н.Станкевич. Релаксация плугазовых выбросов пенным заслоном. - Ж. Безопасность труда в промышленности, 1992. - № 5. - С. 45-46.

54. Статьи № 33, 34, 36, 41 переведены и опубликованы в США.

Авторские свидетельства.

1. А.с. № 4007245 (СССР). Плоский генератор / А.М.Солодовников, Л.А.Чередниченко, 1987.

2. А.с. № 1645551 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, А.С.Беликов, В.В.Семенов, 1991.

3. А.с. № 1661448 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич, 1991.

4. А.С. № 16221203 (СССР). Устройство для получения пенного аэрозоля / А.М.Солодовников, А.С.Беликов, С.Н.Станкевич и др., 1990.

5. А.с. № 1700263 (СССР). Устройство для получения пенного аэрозоля / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич и др., 1991.

6. А.с. № 1536017 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич, 1989.

7. А.с. № I5327I7 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, 1989.

8. А.с. № I320I43 (СССР). Укрытие места загрузки ленточного конвейера / Г.Н.Крикунов, А.М.Солодовников, Л.А.Чердиченко, 1987.

9. А.с. № I4I3505 (СССР). Устройство для определения кратности пены / А.М.Солодовников, Д.И.Мустафин, Н.В.Близнюк, В.В.Брадихин, 1988.

10. А.с. № I70I936 (СССР). Устройство для получения пенного аэрозоля / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич и др., 1991.

11. А.с. № I5327I6 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич, 1989.

12. А.с. № I3357I9 (СССР). Пеногенератор, 1967.

13. А.с. № I70I936. Устройство для получения пенного аэрозоля, 1991.

14. А.с. № I700263. Устройство для получения пенного аэрозоля, 1991.

15. А.с. № I730469 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов и др., 1990.

16. А.с. № I669503 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, др., 1991.

17. А.с. № I669503 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, 1991.

18. А.с. № I745306 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников и др., 1992.

19. А.с. № I745306 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов и др., 1992.

20. А.с. № I74069I (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, 1992.

21. А.с. № I7577II (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов и др., 1992.

22. А.с. № I752979 (СССР). Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, 1992.

23. А.с. № I76I244 (СССР). Устройство для получения пенного аэрозоля / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, 1992.

Заявки с положительными решениями "ВИНИТИ".

I. Заявка № 4860089/26/068139. Устройство для получения

пенного аэрозоля / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, 1990.

2. Заявка № 4859378/03/067816. Устройство для получения пенного аэрозоля / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич, 1990.

3. Заявка № 4839947/03/066634. Устройство для получения пенного аэрозоля / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич, 1990.

4. Заявка № 4799767/26/026574. Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич, 1990.

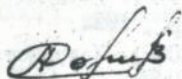
5. Заявка № 4847772/26/07698. Устройство для получения пенного аэрозоля / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич, 1990.

6. Заявка № 4703048/31-26/055036. Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич, 1990.

7. Заявка № 4860089/26/0881139. Устройство для получения пенного аэрозоля / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич, 1989.

8. Заявка № 4545456/31-03/018707. Устройство для пылеулавливания / А.М.Солодовников, Г.Н.Крикунов, С.Н.Станкевич, 1989.

Соискатель



СОЛОДОВНИКОВ А.М.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ, РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ

Ответственный за выпуск: В.Т.Заика.
 Подписано к печати 15.04.93 г. Формат 60х84/16. Бумага офсетная.
 Офсетная печать. Условн. печ. л. 2,09. Условн. кр. отт. 2,09.
 Тираж 100. Заказ № 2593.
 Издательско-полиграфическое арендное предприятие "Днипро".
 ИЦАП "Днипро", 320070, г. Днепропетровск, ул. Серова, 7.



AB 27.558