

КАЧАН
Владимир Николаевич

**Оптимизация параметров обеспыливания
воздуха и предупреждения взрывов пыли
в угольных шахтах**

05.26.04 - Технические средства защиты
окружающей среды
05.26.01 - Охрана труда

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук**

ДВ 34.947

Диссертационная работа выполнена на кафедре теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской государственной академии строительства и архитектуры.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Пашковский П.С.
- доктор технических наук, профессор Кобцов И.И.
- доктор технических наук, профессор Розкин М.Я.

Ведущая организация - Институт геотехнической механики
Академия наук Украины

Защита диссертации состоится "25" июня 1996 г. в 13⁰⁰ на заседании специализированного Совета, шифр Д27.01.01 по присуждению учёной степени доктора технических наук в Донбасской государственной академии строительства и архитектуры (339023, г. Макеевка, ул. Державина, 1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донбасской государственной академии строительства и архитектуры.

Автореферат разослан "24" мая 1996 г.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00754623 (R)

ученый секретарь специализированного Совета

доктор технических наук,
профессор



Братчун В.И.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Очистка промышленных газов - важнейшая научно-техническая, социальная и экологическая проблема. Одновременно это и важная экономическая задача. Она связана, с одной стороны, с огромнейшими затратами на пылегазоочистку (до 40% от себестоимости продукции) и, с другой, с возвращением в производство десятков млн. т ценной пыли (руды, цемента, золы, пищевых продуктов и др.).

Высокая интенсивность пылеобразования и пылеотложения в шахтах, вызванные переходом горных работ на глубокие горизонты, а также широким внедрением высокопроизводительной техники, привели к увеличению потенциальной опасности взрывов угольной пыли. Обеспыливание воздуха и предупреждение взрывов в должной мере решают вопросы охраны труда в угольных шахтах.

До середины 60-х годов для предупреждения взрывов угольной пыли повсеместно применялось осланцевание горных выработок. В условиях интенсивного пылеобразования осланцевание оказалось неэффективным. Число взрывов пыли исчисляется в мировых масштабах тысячами. Кроме того, применение инертной пыли несовместимо с гидрообеспыливанием воздуха и способствует росту заболеваемости рабочих пневмокониозом. К тому же осланцевание дорогостоящее и антисанитарное мероприятие.

Попытки замены осланцевания носили случайный и научно необоснованный характер. Например, использование воды без добавок ПАВ полностью отрицалось. Отсутствуют способы пылевзрывозащиты непрерывного действия, средства обеспыливания воздуха работают не в оптимальном режиме. Недооценивается опасность фрикционного искрения и электростатически заряженных аэрозолей пыли.

Отсутствие единого представления о механизме обеспыливания сдерживает разработку научно обоснованных и оптимальных параметров работы пылеуловителей, в том числе орошения. Поэтому запылённость воздуха и пылеотложение в выработках остаются весьма высокими.

Тема диссертации направлена на кардинальное решение проблем обеспыливания воздуха и, частично, на его основе предупреждения взрывов угольной пыли. Народнохозяйственное значение диссертации подтверждается ещё и тем, что она выполнена по материалам НИР, включённых в планы б.ГКНТ СССР, АН УССР отраслевых планов и Центральной комиссии по борьбе с пневмокониозом.

Целью исследований является: оптимизация технологий обеспыливания воздуха и предупреждения взрывов пыли в угольных шахтах; разработка научно обоснованных моделей механизма очистки газа в пылеуловителях и способов взрывозащиты; изучение новых источников воспламенения

пыли, а также создание новых средств защиты от взрывов пыли, обеспечивающих безопасные условия труда шахтёров.

Поставленная в работе цель достигалась путём анализа литературных данных; практических рекомендаций и опыта работы шахт; математическое моделирование и расчёты на ЭВМ; многофакторный анализ методами парной и множественной корреляции; методы вероятностной оценки механизмов действия способов обеспыливания и предупреждения взрывов; технический, элементный и другие методы анализа пылей, углей и горных пород; скоростная киносъёмка процессов; натурные наблюдения на предприятиях; экспериментальные взрывы в опытной шахте и штольне МакНИИ; статистические методы обработки результатов исследований; опытно-промышленная проверка и внедрение; экономический и социальный анализ.

На защиту выносятся:

1. Вероятностный метод моделирования систем обеспыливания воздуха, учитывающий полидисперсный характер очищаемой среды. Этот метод предполагает разделение процесса на последовательные и параллельные элементарные зависимые и независимые события (стадии), объединяемые законами вероятностей в единое математическое выражение.
2. Математическая модель гидрообеспыливания воздуха, позволяющая оптимизировать с помощью ЭВМ параметры систем орошения с целью повышения их эффективности до 95-99%, что существенно уменьшает пылевзрывоопасность горных выработок и затраты на их взрывозащиту. В основу модели положена вероятностная оценка эффективности обеспыливания по пяти последовательным стадиям протекания процесса.
3. Методика аналитического расчёта дисперсного состава капель жидкости, распыляемой оросителями центробежного и струйного типов, в том числе унифицированными форсунками и насадками.
4. Вероятностные модели очистки газов в циклонах, рукавных и волокнистых фильтрах. Они учитывают одновременное влияние на степень очистки сил инерции, гравитации, а также диффузионный и электростатический перенос частиц. Получены пакеты программ для выбора и расчёта оптимальных параметров работы этих пылеуловителей.
5. Параметрический ряд пылеуловителей сварочного аэрозоля, включающего в себя 3-4-х ступенчатую очистку. Получено теоретическое выражение для расчёта эффективности очистки в жалюзийных инерционных аппаратах.
6. Способ непрерывного связывания пыли с помощью туманообразующих завес, приемлемый практически при любом пылеотложении и относительной влажности воздуха. Его применение снижает запылённость до

санитарных норм.

7. Другие способы пылевзрывозащиты, впервые описанные теоретически. Выявлена возможность взрыва угольной пыли от фрикционных искр, разработана методика оценки опасности электростатически заряженных аэрозолей, рекомендованы способы взрывозащиты от этих источников.

8. Прогноз пылевзрывоопасности и способы предупреждения взрывов пыли в глубоких шахтах, для которых разработаны: очистка исходящего воздуха от пыли, сухая уборка осевшей пыли, а также связывание её гигроскопическим туманом и пастами.

Достоверность научных положений подтверждается:

- адекватностью расчётных на ЭВМ и экспериментальных данных при расчёте оптимальных параметров обеспыливания воздуха;
- результатами сравнения теоретических и опытных данных, полученных в лаборатории и в условиях подземной шахты МакНИИ;
- опытом проектирования и эксплуатации систем вентиляции;
- длительной эксплуатацией комплекса пылевзрывозащиты более, чем на 250 шахтах б.Минуглепрома СССР.

Новизна научного исследования:

1. Предложен вероятностный метод моделирования массообменных процессов в аэрополидисперсных средах, заключающийся в расчленении процесса на отдельные последовательно протекающие независимые события (стадии). Последние в свою очередь описываются уже несколькими по-разному действующими силами. Вероятностный подход упрощает математическую интерпретацию самых сложных процессов (в том числе гидрообеспыливание воздуха) и облегчает оптимизацию их параметров.

2. Разработаны математические модели очистки газов от пыли в циклонах, фильтрах, а также гидрообеспыливания воздуха на основе вероятностного характера взаимодействия пылинок с улавливающими элементами (каплями, волокнами, поверхностями аппаратов) за счёт инерционных, адгезионных, электростатических сил, диффузионного и турбулентного переноса частиц на различных стадиях процесса пылеочистки. Модели обеспечивают расчёт на ЭВМ оптимальных параметров работы пылеуловителей и систем орошения с целью снижения запылённости до ПДК в выбросах или на рабочих местах.

3. Установлен критерий эффективности форсунок характеризующий степень перекрытия пылевого потока единицей массы жидкости в единицу времени. Разработана методика подбора их, обеспечивающая 100%-ую встречу пылинок с каплями при минимальном расходе жидкости.

4. Разработана методика аналитического расчёта размеров капель жидкости, распыляемой центробежными и струйными форсунками. В осно-

ву расчёта положен энергетический баланс струи жидкости с учётом сил аэродинамического сопротивления, дробления и внутреннего трения.

5. Предложен новый способ непрерывного связывания пыли в выбросах с интенсивным пылеотложением, основанный на использовании тумана для конденсационного увлажнения пылинок и диффузионного осаждения мелких капель и пыли. Установлены закономерности процесса и разработана методика расчёта его параметров.

6. Впервые в стендовых условиях зарегистрирован взрыв угольной пыли фрикционными искрами. Скоростная киносъёмка показала воспламенение сначала пиритной пыли с передачей пламени на облако угольной пыли. Установлен критерий флегматизации среды, учитывающий условия образования искр, плотность орошения, свойства и размер капель.

7. Научно обоснована и доказана возможность взрыва пылегазовых смесей в угольных шахтах от электрозаряженных аэрозолей.

8. На основе изменения влагонасыщенности горного массива с глубиной разработаны теоретические предпосылки к выбору способов, обеспечивающих пылевзрывозащиту в глубоких шахтах.

Перечисленные элементы научной новизны исследований позволяют утверждать, что их совокупность можно квалифицировать как решение важной научно-технической проблемы, имеющей не только народно-хозяйственное, но и существенное социально-экологическое значение, связанное с охраной труда и защитой окружающей среды.

Практическое значение работы.

Вероятностный метод моделирования массообменных процессов позволил разработать математические модели и соответствующие им пакеты программ выбора пылеулавливателей и расчёта на ЭВМ оптимальных режимов их работы. При этом степень очистки доводится до требуемого уровня при минимальных затратах. Экономический эффект составляет 10-40 тыс. руб в год на одну вентиляционную установку (в ценах 1989 г.)

Математическая модель гидрообеспыливания воздуха позволяет оптимизировать параметры работы оросительных систем и тем самым снизить запылённость воздуха до уровня, близкого к ПДК. При этом интенсивность пылеотложения снижается в десятки раз.

Разработанный комплекс пылевзрывозащиты заменил малоэффективную, дорогостоящую и несовместимую с обеспыливанием сланцевую защиту. Внедрение гидровзрывозащиты более, чем на 250 шахтах привело к повышению взрывобезопасности и снижению запылённости воздуха в горных выработках, в том числе и на вентиляционном горизонте до уровня ПДК и ниже. Эффект от внедрения комплекса, помимо социального, составил в среднем на одну шахту 40 тыс. руб. в год (в ценах 1989 г.).

Реализация результатов работы на практике.

Разработан пакет программ для выбора пылеуловителей и параметров их работы в оптимальном режиме, в том числе циклонов, рукавных и волокнистых фильтров, аппаратов для очистки сварочного аэрозоля, водяных завес и систем орошения на комбайнах.

Программы CYCLON, CF, VOLF, FILTR, GIDROS и др. используются не менее, чем в 10 проектных институтах России и Украины.

Разработаны разделы первой части "Инструкции по предупреждению и локализации угольной пыли способами, основанными на применении воды", согласованной с Госгортехнадзором б.СССР и утверждённой Минуглепромом б.СССР.

Внесены изменения и дополнения в "Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах", Недра, 1973 г. /§§ 204-211, Прил. 10/.

Материалы исследований по крутым пластикам использованы при составлении "Каталога шахтопластов СССР по пылевому фактору" и "Руководства по борьбе с пылью в угольных шахтах".

Подготовлены "Технические требования к проектированию системы взрывозащитного орошения на проходческих комбайнах с фрезерным исполнительным органом" и "Техническое задание на проектирование параметрического ряда пылеулавливающих установок для очистки воздуха, исходящего из лав".

По состоянию на 1.01.86 г. комплекс пылевзрывозащиты внедрён более чем на 250 шахтах Донецкого, Львовско-Волинского, Кузнецкого, Карагандинского и др. бассейнов. Методики расчёта, математическая модель и способы пылевзрывозащиты используются в учебном процессе ИПК. Ряд разработок удостоены медалей б.ВДНХ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на: совещаниях б.Минуглепрома СССР /Москва, 1970, 1972, 1982/, Госгортехнадзора СССР /Москва, 1984/, Донецкого округа Госгортехнадзора УССР /Донецк, 1968, 1971, 1984/, Всесоюзных научно-технических конференциях /Новокузнецк, 1969; Макеевка-Донбасс, 1970; Караганда, 1982, 1985/, Совещаниях центральной и республиканской комиссий по борьбе с пневмокониозом /Харьков, 1968; Москва, 1981, 1985; Павлоград, 1980/, технических совещаниях ПО Эстонсланец /Кохтла Ярве, 1970/, Артёмуголь /Горловка, 1968/, Донецкуголь /Донецк, 1969/, научно-техническом совете ЦНИИПодземмаш /Москва, 1974/, Всесоюзном научно-техническом совещании Минуглепрома СССР /Москва, 1975/, ВостНИИ /Кемерово, 1982/, на семинаре в ИГТМ АН УССР, на конференциях МИСИ /Макеевка, 1977, 1978/, РИСИ /Ростов-на-Дону, 1984, 1985, 1987, 1989/, Всесоюзных конференциях /Севастополь, 1985, 1986; Пермь, 1986; Одесса, 1986, 1990/, семина-

рах ЛГИ /1984, 1988/, ИнФОУ АН УССР /Донецк, 1983, 1985/, Московского энергетического института /1984/.

Публикации. По результатам выполненных исследований с участием автора опубликовано свыше 120 работ, из них 4 монографии, 2 брошюры и 8 нормативных документов.

Объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 9 глав и заключения, изложенных на 411 страницах машинописного текста, в том числе: 59 рисунков, 63 таблиц и 1 приложений. Список использованной литературы включает 303 наименований.

Автор считает приятным долгом поблагодарить сотрудников ДонГА-СА, ИнФОУ АН Украины и МакНИИ, принявших участие в проведении экспериментов, а также д.т.н. Саранчука В.И. и к.т.н. Петрухина П.М. за научную и организационную помощь.

1. Состояние проблемы

Проблеме очистки промышленных выбросов посвящены исследования многих зарубежных и отечественных ученых. Среди них В.Страус, И.Лэнгмюр, С.Деви, Ю.П.Хлебников, Б.З.Теверовский, Л.М.Васильев, Б.И.Мягков, П.А.Коузов, А.А.Эннан, М.Я.Розкин, В.Н.Молчанов, В.П.Куркин и др. Ими созданы теоретические основы процессов очистки газов от пыли, но в большинстве случаев исследования велись на уровне пылинки-улавливающий элемент. В условиях массовых процессов с полидисперсным аэрозолем, где без ЭВМ не обойтись, исследований практически не было. Поэтому теоретически рассчитать режим работы и эффективность пылеуловителя не представлялось возможным.

Первые исследования в области предупреждения взрывов угольной пыли проведены М.Таффанелем, позже А.А.Скочинским, Л.Н.Быковым. Теоретические основы заложены Н.Н.Семёновым, Я.Б.Зельдовичем, В.Н.Кондратьевым и их учениками.

К числу важных прикладных работ следует отнести исследования П.М.Петрухина, С.С.Шановской, И.В.Боброва, А.М.Недина, О.Д.Нейкова, М.И.Нецепляева, В.С.Сергеева, М.А.Стрельчука, С.И.Осипова, А.И.Розловского и др. В работах этих учёных решены конкретные вопросы взрывозащиты на предприятиях порошковой металлургии, угольной, химической, газовой промышленности. Вместе с тем решение проблемы, особенно для угольных шахт, ещё не доведено до научно обоснованного количественного уровня, что снижает возможную эффективность способов пылевзрывозащиты и сдерживает их повсеместное внедрение.

Главным направлением в решении экологических проблем и предупреждении взрывов угольной пыли является предварительное обеспыливание воздуха путём орошения мест пылеобразования и устройства водяных завес. Этим исследованиям посвящены работы А.С.Бурчакова, Г.С.Гроделя, В.П.Журавлёва, В.К. Журавлёва, И.Г.Ищука, Б.Ф.Кирина, Э.Н.Медведева, В.В.Кудряшова, Л.Я.Лихачёва, И.И.Медведева, Г.А.Позднякова и др. Все эти работы выполнены на должном научно-техническом уровне, но для конкретных условий и поэтому носят разрозненный, а часто и противоречивый характер. В настоящее время нет единого мнения об оптимальности орошения в частности выбора форсунок и необходимого давления, дисперсности распыляемой жидкости и других параметров.

Цель работы определила необходимость решения следующих задач:

- создать вероятностный метод моделирования очистки воздуха от пыли;
- разработать модель гидрообеспыливания воздуха и с её помощью оптимизировать процесс орошения на ЭВМ;
- разработать методики расчёта размера капель и выбора оросителей;
- создать математические модели очистки газов от пыли в циклонах, фильтрах, инерционных аппаратах для разработки программ выбора и расчёта на ЭВМ оптимальных параметров их работы;
- оценить опасность фрикционных искр и электростатически заряженных аэрозолей;
- изыскать новые способы предупреждения взрывов угольной пыли в выработках с интенсивным пылеотложением;
- разработать и научно обосновать выбор способов пылевзрывозащиты глубоких шахт;
- дать экономическую и экологическую оценку новым разработкам.

2. Разработка математической модели гидрообеспыливания воздуха

В основу создания моделей обеспыливания воздуха в разных аппаратах положен вероятностный метод моделирования массообменных процессов в полиаэродисперсных средах. Этот метод предполагает условное разделение процесса на отдельные последовательно и параллельно протекающие зависимости и независимые между собой события (стадии). Последние (каждая в отдельности) описываются зависимостями, в основу которых положено действие тех или иных сил. Математически эти события объединяются в вероятностные блок-схемы протекания процесса и выражаются в виде цепочки формул.

Вероятностный подход упрощает математическое описание самых

сложных процессов и облегчает оптимизацию их параметров.

В работе вероятностный метод моделирования реализован для процесса обеспыливания воздуха орошением, в циклонах и рукавных фильтрах. В целом же этот метод носит универсальный характер. Он был использован для описания математических моделей работы различных пылеочистных аппаратов и абсорберов. Метод приемлем для адсорберов, при подготовке угольной шихты к сжиганию в кипящем слое котельных агрегатов, оптимизации отдельных химических производств (например, при получении бензола, серной кислоты и др.) с целью приближения их к безотходной технологии.

В общем виде механизм улавливания пыли орошением включает два процесса: слияние пылевых и водяных частиц (коагуляцию) и оседание полученных конгломератов (седиментацию).

При движении капель и твердых частиц на них действуют силы тяжести и инерции, а также аэродинамические силы. При подлете пылинки к капле на расстояние 3-4-х её радиусов начинают действовать электростатические силы, а для мельчайших частиц (менее 1 мкм) при малых скоростях существенное влияние оказывает диффузионный и турбулентный перенос частиц.

Для эффективного увлажнения витающих частиц диспергированной жидкостью в условиях массовых процессов необходимо выполнение пяти последовательных условно зависимых событий, осуществляемых с определённой степенью вероятности: геометрической встреча пылинки с каплей (r_g); их соприкосновение (r_c); удержание пылинки каплей при лобовом сопротивлении потока (r_y); захват (r_3) с погружением пылинки в каплю и оседание капли с уловленными пылинками (r_o).

Учитывая условную зависимость и последовательность совместных событий, эффективность гидрообеспыливания орошением можно представить в виде произведения вероятностей:

$$\epsilon = r_g \cdot r_c \cdot r_y \cdot r_3 \cdot r_o \quad (1)$$

Первое событие предусматривает сближение (встречу) капли с частицей пыли до расстояний, на которых начинают действовать молекулярные силы (≈ 8 нм). При этом учитывается одновременное действие инерционных и электрических сил, а также турбулентный перенос частиц. При действии только сил инерции капель будут встречены пылинки, находящиеся в цилиндрическом объёме, сечение которого равно сечению капли. В действительности общий объём пылевого потока, в котором пылинки могут встретиться с каплей, значительно больше за счёт притяжения пылинок под действием турбулентного переноса и электростатических сил.

Здесь возможны два случая: когда турбулентная составляющая преобладает над электростатической и наоборот. Для конкретной взаимодействующей пары пылинки-капля к расчёту должна быть принята большая из них. Таким образом при встрече действуют два зависимых события с вероятностями $r_{e.u}$ и $r_{e.m.}$, которые характеризуют вероятность встречи за счёт инерционных и одновременно за счёт одной из больших (турбулентной или электростатической составляющих). Поэтому вероятность r_e можно записать как

$$r_e = 1 - (1 - r_{e.u})(1 - r_{e.m.}) \quad (2)$$

В общем виде для i -ой капли объёмом (V_{κ_i}) и j -ой пылинки (V_{n_j}) в объёме воднопылевого потока V вероятность их встречи равна:

$$r_{ej} = 1 - (1 - V_{\kappa_i}/V)(1 - V_{n_j}/V) \quad (3)$$

После соответствующих преобразований, учитывая, что $V_{n_j} \ll V_{\kappa_i}$, формула (2) преобразуется к виду

$$r_e = r_{e.u} + \Delta r_{e.m.}, \quad (4)$$

где $\Delta r_{e.m.}$ - суммарное приращение вероятности встречи за счёт турбулентного переноса частиц и электростатических сил.

В формуле (4) события с вероятностями $r_{e.u}$ и $\Delta r_{e.m.}$ являются уже несовместными и даже противоположными при условии, что $r_e = 1$. Для полидисперсного воднопылевого потока последнее событие для всей совокупности капель в объёме выработки можно выразить уравнением

$$r_e = 1 - \prod_{i=1}^{n_{cl}} (1 - r_{ei}) = 1 - \left[1 - \left(\frac{V_{u_i}}{V} + \frac{\max\{\Delta V_{m_j}; \Delta V_{z_j}\}}{V} \right) \right]^{n_{cl}}, \quad (5)$$

где n_{cl} - количество слоёв капель в потоке на рассматриваемой длине; V_{u_i} - объём пылевого потока, пыль из которого может быть уловлена каплей i -го размера за счёт инерционных сил, m^3 ; ΔV_{m_j} и ΔV_{z_j} - приращение объёмов, из которых пыль j -го размера может быть уловлена каплями i -го размера за счёт соответственно турбулентного и электростатического влияния, m^3 .

При расчёте по формуле (4) возможны два случая. Первый, когда второе слагаемое больше нуля, что имеет место при продолжительном совместном полёте пылинки с каплей, например, при орошении на стругах и работе водяных завес. И, второй, при локальных источниках пылеобразования (комбайны, пересыпы), когда второе слагаемое близко нулю. В последнем случае при $r_{e.u} \approx 1$ происходит встреча за счёт турбулентного переноса частиц и действия на них электростатических сил. Часто $r_{e.m.} \ll 1$,

однако она важна и учитывается при расчёте улавливания тонких фракций пыли.

Второе событие в выражении (1) предполагает соприкосновение пылинок с каплями. Этот эффект соприкосновения определяется по формуле Лэнгмюра. Для полидисперсного воднопылевого потока он равен:

$$r_{c.u} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{stk_{ij}^2}{(stk_{ij} + 0,125)^2} \cdot m_i \cdot n_j, \quad (6)$$

$$stk_{ij} = \frac{\rho_n d_{n_j}^2 (\vartheta_{\kappa_i} - \vartheta)}{9 D_{\kappa_i} \mu}, \quad (7)$$

где m_i , n_j - массовые доли соответственно каплей i -го размера и пыли j -го размера; d_{n_j} - диаметр пылинки, м; ρ_n - плотность пыли, кг/м³; ϑ_{κ} , ϑ - скорости капли и воздуха, м/с; D_{κ} - диаметр капли, м; μ - динамическая вязкость газа, Па·с;

Третье событие ($r_{y.d}$) предполагает удержание пылинки на капле при воздействии на них сил лобового сопротивления. Вероятность этого события зависит от соотношения адгезионных и аэродинамических сил.

Для общей массы пыли:

$$r_{y.d.u} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_{d.n.max_i}} m_i n_j, \quad (8)$$

где $N_{d.n.max_i}$ - фракция пыли с максимальным диаметром пылинок, удерживаемых каплями i -го размера. Этот диаметр рассчитывается по формуле:

$$d_{n.max_i} = \frac{0,116 Re_i \sigma_{ж.г.д_i} (1 + \cos \Theta_{d_i})^2}{\rho_n (\vartheta_{\kappa_i} \pm \vartheta)^2 \sin \Theta_{d_i} (1 - \cos \Theta_{d_i})}, \quad (9)$$

где $\sigma_{ж.г.д_i}$ - поверхностное натяжение жидкости через время τ_i , Н/м; Θ_{d_i} - гистерезисный краевой угол смачивания, град.

В результате четвёртого события пылинки захватываются каплей. При этом освобождается поверхность капли от пыли для улавливания других пылинок, что способствует росту общей эффективности орошения. Полное смачивание частиц пыли происходит благодаря силам адгезии и инерции.

По виду встречи также различаются $r_{з.м.э}$ и $r_{з.м}$, равные:

$$r_{з.м} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=N_{d.n.min_i}}^N m_i n_j, \quad (10) \quad \text{где } d_{n.min_i} = \frac{12 \sigma_{ж.г.д_i} (1 - \cos \Theta_{d_i})}{\rho_n (\vartheta_{\kappa_i} \pm \vartheta)^2} \quad (11)$$

Захват нужно учитывать при концентрациях пыли более 10 г/м³.

Последнее событие (r_o) определяет вероятность оседания конгломератов пыль-капля за счёт сил гравитации:

$$r_o = r_{o,k} + r_{o,l}(1 - r_{o,k}), \quad (12)$$

где $r_{o,k}$, $r_{o,l}$ - вероятности оседания капель с уловленными пылинками и пылинок с осевшими на неё каплями меньших размеров. Эти события являются совместными, зависимыми и параллельно проявляющимися. Расчёт этих вероятностей ведётся по формулам Стокса:

В развёрнутом виде эффективность гидрообеспыливания представлена в виде блок-схемы, показанной на рис. 1. Следует отметить, что взаимодействие пылинок с каплями возможно как при инерционной встрече с вероятностями $r_{c,u}$, $r_{уд,u}$, $r_{з,u}$, так и за счёт турбулентного переноса и электростатических сил ($r_{c,т,э}$, $r_{уд,т,э}$, $r_{з,т,э}$). Последнее учтено блок-схемой.

Для локальных источников пылеобразования в оросительных системах очистных и проходческих комбайнов и пересыпов события $\Delta r_{в,т}$ и $\Delta r_{в,э}$ близки нулю, а $r_{в,т,э} \ll 1$, т.к. продолжительность контакта пылинок с каплями мала ($\tau \ll 1$ с). Для систем орошения на стругах и вентиляционных штреках, где $\tau > \tau_{ф}$, величина $\Delta r_{в,т}$ и $\Delta r_{в,э}$ значительны, поэтому $\Delta r_{в,т,э}$ соизмеримо с $r_{в,и}$ или значительно превышает его.

В математической форме эффективности обеспыливания согласно блок-схеме (см. рис. 1) описываются выражениями:

- для локальных систем пылеобразования

$$\mathcal{E}_л = (r_{в,и} r_{c,u} r_{уд,u} r_{з,u} + \Delta r_{в,т,э} r_{c,т,э} r_{уд,т,э} r_{з,т,э}) [r_{o,k} + r_{o,l}(1 - r_{o,k})] \quad (13)$$

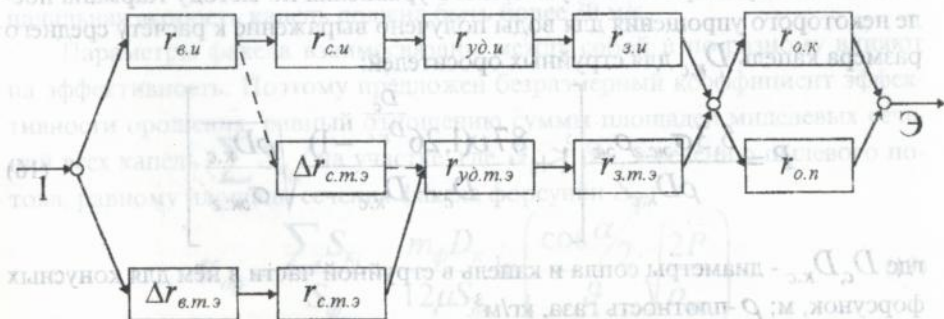


Рис. 1. Вероятностная блок-схема расчёта эффективности гидрообеспыливания

- для протяжённых пылевых потоков

$$\Theta_n = (r_{в.и} r_{с.и} r_{у.д.и} r_{з.и} + \Delta r_{в.т.э} r_{с.т.э} r_{у.д.т.э} r_{з.т.э} + r_{в.и} \Delta r_{с.т.э} r_{у.д.т.э} r_{з.т.э}) \times \\ \times [r_{о.к} + r_{о.л} (1 - r_{о.к})] \quad (14)$$

Модель позволила разработать алгоритм и программу расчёта на ЭВМ оптимальных параметров гидрообеспыливания воздуха.

3. Теория расчёта размера капель и выбора форсунок.

Оптимизация параметров орошения на ЭВМ

При расчёте среднего диаметра капель $D_{к.ц}$ для центробежных оросителей принята гипотеза о дроблении утончающейся плёнки расширяющегося полого конуса с соблюдением энергетического баланса струи во времени. В балансе учитываются расходы энергии на преодоление сил аэродинамического сопротивления, внутреннего трения и дробления плёнки на капли. Для воды расчётное уравнение упрощается до вида

$$D_{к.ц} = 79 \pi D_c^2 \nu \varphi_{ц} \rho_{ж} / m_{ф} \sin \alpha / 2, \quad (15)$$

где D_c - диаметр сопла форсунки, м; $\varphi_{ц}$ - коэффициент заполнения сопла; $m_{ф}$ - расход жидкости, кг/с; α - угол раствора факела, град; $\rho_{ж}$ - плотность жидкости, кг/м³; ν - кинематическая вязкость газа, м²/с.

Сравнение расчётных данных с экспериментами МакНИИ и других организаций показало, что отклонения не превышают 12-31%.

Для струйных форсунок принята гипотеза о дроблении струи и капель в соответствии с критерием Вебера при соблюдении того же энергетического баланса. Путём решения кубического уравнения по методу Кармана после некоторого упрощения для воды получено выражение к расчёту среднего размера капель $D_{к.с}$ для струйных оросителей:

$$P = \frac{5,3 \sigma_{ж.г} \rho_{ж}}{\rho D_{к.с}} \left[1 + \frac{87 \alpha (1,26^{\frac{D_c}{D_{к.с}}} - 1)}{D_c + D_{к.с}} \sqrt{\frac{\rho D_{к.с}}{\sigma_{ж.г}}} \right] \quad (16)$$

где $D_c, D_{к.с}$ - диаметры сопла и капель в струйной части в нём для конусных форсунок, м; ρ - плотность газа, кг/м³.

Выражение (16) вводится в программу для ЭВМ либо решается графически для конкретной форсунки. Отклонение экспериментальных данных от расчётных в интервале 0,5-12,5 МПа не превышает 20%, а для давления 10 МПа отмечается совпадение результатов.

Центробежно-струйные (конусные) форсунки отличаются наличием

двух потоков, на которые разделяется жидкость. Среднемедианный диаметр капель для любых форсунок рассчитывается по формуле:

$$D_k = D_{к.ц} \frac{F_o + F_{\phi} - F_{с.с}}{F_{\phi} + F_o} + D_{к.с} \frac{F_{с.с}}{F_{\phi} + F_o}, \quad (17)$$

где $F_o, F_{\phi}, F_{с.с}$ - сечения соответственно центрального отверстия вкладыша, боковых отверстий и струйной частью сопла, м^2 .

Зависимости (15-17) включены в математическую модель.

Выбор типа оросителей зависит от условий пылеподавления и, в частности, от времени совместного нахождения капель и пылинок в потоке. В активной зоне факела, когда $\mathcal{G}_{k_i} > \mathcal{G}$,

$$\tau_{\phi_i} = \frac{D_{к_i}^2 \rho_{жс}}{18\mu} \ln \frac{\mathcal{G}_{к.макс} \cos \frac{\alpha}{2}}{\mathcal{G}} \quad (18)$$

Из выражения (18) следует, что чем крупнее капли и выше их скорость вылета, тем больше время пребывания капель в активной зоне факела.

Для эффективного гидрообеспыливания воздуха необходимо подобрать минимальное количество оросителей, чтобы их факелы полностью перекрывали пылевой поток. Поэтому лучше, если сечение факела будет большим. Размер капель должен быть оптимальным для максимальной коагуляции пылинок с каплями и последующего эффективного их осаждения. Водонасыщенность потока должна быть высокой и равномерной. Чем больше дальнобойность факела, тем лучше. Это обеспечивается более крупными каплями и большой скоростью их вылета из форсунок. Поэтому начальная скорость капель должна быть более 30 м/с.

Параметры факела взаимосвязаны между собой и по-разному влияют на эффективность. Поэтому предложен безразмерный коэффициент эффективности орошения, равный отношению суммы площадей миделевых сечений всех капель / $\sum S_{к_i}$ / на участке, где $\mathcal{G}_{к_i} > \mathcal{G}$, к сечению пылевого потока, равному площади сечения факела форсунки S_{ϕ} :

$$K_{op} = \frac{\sum S_{к_i}}{S_{\phi}} = \frac{m_{\phi} D_k}{12\mu S_{\phi}} \ln \left(\frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\mathcal{G}} \sqrt{\frac{2P}{\rho_{жс}}} \right) \quad (19)$$

Этот коэффициент характеризует степень перекрытия сечения пылевого потока каплями данной форсунки в активной зоне факела, где и происходит инерционная коагуляция. Чем больше K_{op} , тем выше вероятность встречи пылинки с каплями, тем выше эффективность гидрообеспыливания. Если $K_{op} > 1$, то для данной форсунки при конкретном давлении ха-

рактен перерасход жидкости. Причём, коэффициент орошения показывает, во сколько раз фактический расход жидкости превышает или меньше оптимального.

Анализ выражения (19) показывает, что коэффициент эффективности орошения зависит в основном от типа форсунки и крайне слабо от давления. Так, для форсунки 3Ф-3,3-75 коэффициент орошения при изменении давления в 100 раз (0,1-10 МПа) увеличивается с 0,35 до 0,88, т.е. всего в 2,5 раза. Сравнивать форсунки по коэффициенту K_{op} нельзя, т.к. при этом не учитывается удельный расход жидкости на орошение 1 м² сечения потока. Поэтому для их оценки предложен показатель эффективности форсунок $K_{ф.уд}$ (м²с/кг.м), который показывает, какое удельное сечение пылевого потока перекрывается секундным расходом жидкости на единице длины зоны активного факела, создаваемого форсункой. Причём, излишне расходуемая жидкость в расчёт не принимается, поэтому коэффициент эффективности орошения берётся равным или меньше единицы. В последнем случае довести расход жидкости до оптимального всегда можно путём увеличения количества форсунок. Показатель $K_{ф.уд}$ практически не зависит от давления жидкости.

Форсунка является лучшей, если показатель $K_{ф.уд}$ при одинаковом давлении будет большим. Для орошения более всего подходят конусные форсунки при умеренном расходе жидкости и больших углах раствора факела, например КФ-3,3-75 или КФ-5,0-75. У этих форсунок степень водонасыщенности факела по сечению близка к единице, форма факела - полный конус. При работе этих форсунок образуется факел большего диаметра (до 0,8 м) и поэтому плотность жидкости в факеле близка к оптимальной.

Для протяжённых потоков за счёт турбулентной и, когда $g < 1$ м/с, электростатической коагуляции необходимую степень перекрытия пылевого потока каплями K_{op} можно принимать меньше единицы. Поэтому и показатель $K_{ф.уд}$ заведомо принимается большим. Из числа исследованных лучшая для этих целей форсунка КФ-1,6-75, для которой $K_{op} = 0,56$.

По данной методике возможно проектирование форсунок с заранее заданными параметрами.

Математическая модель процесса учитывает влияние на эффективность более 30 входных параметров, которые можно разделить на четыре группы: показатели аппарата или выработки (места орошения); параметры пылевоздушного потока, свойства жидкости и конструктивные данные форсунок. Оптимизации параметров предшествовали имитационные исследования модели на ЭВМ. Методика экспериментов заключалась в имитации процес-

са для различных значений исследуемого параметра при его изменении от минимума до максимума с заданным шагом. Остальные параметры при этом принимали средние (характерные) значения.

Анализ показал, что эффективность процесса в той или иной степени определяются всеми исследуемыми параметрами. Однако управляемыми и независимыми для конкретных процессов являются лишь пять: тип форсунки, их количество, давление, поверхностное натяжение жидкости и скорость потока. Остальные параметры, входящие в модель, либо являются зависимыми от приведённых выше (например, размер капель, расход жидкости и её электростатическая зарядность), либо не поддаются управлению, либо являются постоянными для данных условий, как, например, параметры выработки или аппарата.

В задачу оптимизации входило нахождение таких значений параметров, которые при заданной эффективности пылеподавления, рассчитанной для достижения ПДК, ТДУ или других пределов, обеспечивают минимальный расход жидкости при наименьшем числе форсунок. Надёжность работы системы орошения и поддержание параметров подбором нужных форсунок и насосного оборудования. Получилась нелинейная статистическая задача, функция цели которой зависит от пяти указанных выше переменных, причем связь эта случайная и нелинейная. Решалась она методом Ψ -преобразований, основанном на использовании имитационного моделирования на ЭВМ. Сравнение расчётных данных с экспериментальными проведено в опытной пылевой стенде и для условий шахты "Донбасс" ПО Донецкуголь.

Получено, что при направлении факела воды по потоку эффективность орошения во всех случаях выше. При спутном движении потоков для давлений более 0,7 МПа эффективность увеличивается в 2-3 раза, так как в этом случае более полно проявляются турбулентный перенос частиц, а при зарядности жидкости более $5 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг электростатические силы. При спутном движении увеличивается время взаимодействия частиц, что способствует более полной коагуляции пыли. Такое сравнение подтвердило теоретические соображения о механизме гидрообеспыливания и согласуется с расчетами на ЭВМ.

В табл. 1 приведены оптимальные параметры орошения по данным расчётов на ЭВМ для комбайна 2К-52М (пл. Ливенский, пл. "Донбасс").

Для расчёта эффективности орошения и выбора оптимальных параметров разработана программа GIDROS. На основе программы разработана "Методика расчёта оптимальных параметров гидрообеспыливания воздуха в угольных шахтах", которая войдёт в новую редакцию

"Руководства по борьбе с пылью в угольных шахтах" и внедрена в учебном процессе б.Донецкого филиала Института повышения квалификации руководящих работников.

Таблица 1.

Оптимальные параметры орошения

Эффективность орошения	Тип форсунки	Число форсунок	Значения параметров			
			Давление, МПа		Скорость потока, м/с	Расход жидкости, л/мин
			воды	0,1% раствора ДБ		
0,9	КФ-3,3-75	8	1,2	1,0	3,6	32,2
0,92	- " -	4	1,5	1,3	2,6	18,6
0,94	- " -	4	1,8	1,6	3,3	20,1
0,96	- " -	4	2,0	1,8	3,8	22,1
0,98	- " -	4	4,0	3,5	2,5	30,1
0,99	- " -	4	6,0	5,9	4,2	39,1

4. Моделирование фильтрационных методов очистки газов

Ниже описываются математические модели работы фильтров для очистки выбросов от пыли. Модели разработаны как и для гидрообеспыливания на основе вероятностного метода. Расчёт оптимальных параметров ведётся с помощью ЭВМ с учётом полидисперсного состава пылевого аэрозоля.

До настоящего времени не было приемлемых для практики программ по выбору и расчёту режимов работы рукавных фильтров. Более того, многие исследователи считали такую задачу невыполнимой из-за влияния на их работу множества взаимозависимых факторов. Основной причиной неудач явились трудности в расчёте пористости пылевого осадка на ткани в процессе фильтрации, определяющей сопротивление системы ткань-пылевой слой. Эта пористость зависит от режима фильтрации, дисперсности, истинной плотности и формы частиц. Объединяющим показателем этих параметров является число Стокса.

Механизм формирования пылевого слоя на ткани состоит в соприкосновении пылинок друг с другом за счёт сил инерции и касания. Пылевой осадок на ткани похож на бахрому, состоящую из пылевых цепочек, мостиков, гирлянд. Такая рыхлость слоя (пористость $\epsilon_{n,n}$) зависит от многих факторов, но в большей мере от режима фильтрации (Re). Кинетическая энергия пылинки $m \cdot g^2/2$, и сила сопротивления сцеплению пылинок с волокном и друг с другом $(-3\pi\mu g d_{50})$ с учётом коэффициентов слипае-

мости и касания позволили получить дифференциальное уравнение вида

$$d\mathcal{E}_{n.l} = \frac{18\mu\vartheta}{C_K g \rho_n K_{cl}} \cdot \frac{dd_{50}}{d_{50}}, \quad (20)$$

где d_{50} - средний медианный диаметр пыли, м; ϑ - скорость фильтрации, м/с; C_K - коэффициент, учитывающий эффект касания пылинок; K_{cl} - коэффициент слипаемости пыли.

Вывод на основе выражения (20) формулы для расчёта фактической пористости пылевого слоя ткани

$$\mathcal{E}_{n.n} = \mathcal{E}_{\min} + (1 - \mathcal{E}_{\min}) \cdot e^{-K_{cl} \cdot stk P_s} \quad (21)$$

предрешил возможность создания математической модели очистки газов в тканевых и волокнистых фильтрах.

В выражении (24): P_s - показатель степени числа stk Стокса, рассчитываемый в зависимости от режима фильтрации; $\mathcal{E}_{\min}$ - минимальная пористость пылевого слоя, определяемая по формуле

$$\mathcal{E}_{\min} = 1 - \rho_n / \rho_{уст}, \quad (22)$$

где ρ_n , $\rho_{уст}$ - насыпная и истинная плотности пыли, кг/м³.

Использование вероятностного метода моделирования позволило учесть в единой блок-схеме (рис.2) влияние всех природных сил на эффективность захвата пылинок волокнами, а также составить баланс потерь давления во времени с учётом запыления ткани и накопления пылевого осадка. Методика разработки такой блок-схемы аналогична таковой при гидрообеспыливания воздуха. Для войлочных (волокнистых) тканей вероятностная блок-схема упрощается, т. к. $r_{в.н} \approx 1$ и поэтому нижняя ветвь на рис. 2 отсутствует. Для полидисперсного пылевого аэрозоля эффективность очистки в любом аппарате, в том числе рукавном фильтре, рассчитывается, исходя из по-фракционных эффективностей $\mathcal{E}_i$ по формуле

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^N \mathcal{E}_i n_i, \quad (23)$$

Известно, что очистка воздуха происходит не только при фильтрации через волокна в ткани, но и через пылевой слой, накапливаемый на ткани за период между повторными регенерациями. Поэтому

$$\mathcal{E}_i = 1 - (1 - \mathcal{E}_T)(1 - \mathcal{E}_{П_i})^{n_{cl}}, \quad (24)$$

где $\mathcal{E}_T$, $\mathcal{E}_{П_i}$ - эффективность очистки от i -ой фракции пыли при фильтрации соответственно через ткань и один слой пыли, доли; n_{cl} - число последовательно встреченных потоком воздуха слоев пыли.

АН Укр

Исходя из блок-схемы (см. рис.2), эффективность очистки воздуха через ткань в целом и отдельные волокна в математической форме можно выразить через вероятности элементарных событий

$$\mathcal{E}_{T_i} = r_{в.и} \left[1 - (1 - \mathcal{E}_{\theta_i})^{n_{\theta}} \right] + (1 - r_{в.и}) \left\{ 1 - \left[1 - \max(r_{с.д.и}, r_{с.э.и}) \right]^{n_{\theta}} \right\}, \quad (25)$$

$$\mathcal{E}_{\theta_i} = r_{с.и.и} + (1 - r_{с.и.и}) r_{с.к.и} + (1 - r_{с.и.и}) (1 - r_{с.к.и}) \max[r_{с.д.и.и}, r_{с.э.и.и}], \quad (26)$$

где $r_{в.и}$ - вероятность геометрической встречи пылинок с нитью, зависящая только от структуры ткани; $r_{с.и.и}, r_{с.к.и}, r_{с.д.и}, r_{с.э.и}, r_{с.д.и.и}, r_{с.э.и.и}$ - вероятности соприкосновения i -ой пылинки с волокном в нити соответственно за счёт сил инерции, при касании, диффузионного и электростатического переноса частиц в свободной (отверстиях между нитями) и инерционной (против нити) частях сечения пылевого потока; n_{θ} - число встреченных пылинкой волокон при её пролёте через ткань.

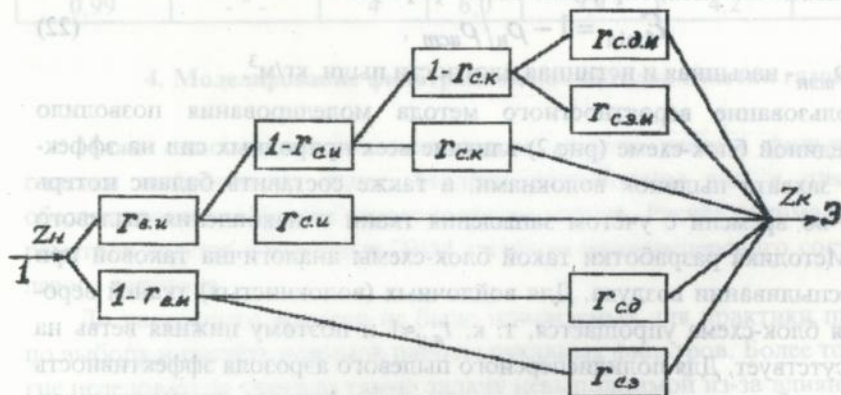


Рис. 2. Вероятностная блок-схема процесса фильтрации газа через пористые перегородки.

В основу создания модели положены работы Н.А.Фукса, Соколова-Петрянова, И.Лэнгмюра и других авторов по диффузионной и электростатической коагуляции.

Аналогично расчёту $\mathcal{E}_{\theta_i}$ по формуле (26) определяется и значение $\mathcal{E}_{П_i}$. Отличие лишь в том, что для слоя пыли $r_{в.и} \approx 1$, а улавливающим элементом служат осевшие пылинки со средним диаметром d_{50} . Для определения n_{θ} и $r_{в.и}$ учитывается структура ткани и нитей. Например, для прямоугольных отверстий при однониточном самом простом переплетении

$$r_{\text{в.и}} = n_o d_o + n_y d_y - d_o d_y n_o n_y, \quad (27)$$

где d_o, d_y - диаметры нитей по основе и утку, м; n_o, n_y - число нитей на 1 п.м ткани, 1/м.

Количество слоёв волокон определяется из выражения:

$$n_g = 0,785 \beta_n (d_o^2 n_o + d_y^2 n_y) \delta_m / d_g l_g, \quad (28)$$

где d_g - диаметр волокна в нитях, м; δ_m - толщина ткани совместно с ворсом, м; l_g - длина волокон, м; β_n - степень упаковки волокон в нити.

Все эти параметры принимаются из технических характеристик тканей.

На основе модели составлены алгоритмы и пакет программ на ПЭВМ CF.EXE, которые используются в ряде проектных организаций для выбора рукавных фильтров и тканей, технико-экономического анализа вариантов и расчёта режима фильтрации. Программа позволяет:

1. При заданной степени очистки выбрать тип фильтра, фильтровальную ткань и рассчитать режим их работы при минимальных затратах.
 2. Зная тип фильтра и ткань, для конкретных скоростей фильтрации и периодичности регенерации рассчитать эффективность очистки, потери давления и основные экономические показатели.
 3. Оптимизировать режим работы фильтров, гарантируя большую эффективность при минимальных расходах электроэнергии и материалов.
- Возможны решения других задач. Можно рассчитать параметры фильтровальной ткани с заранее заданными свойствами, как это сделано автором для сталелитейной и ферросплавной пылей.

Адекватность модели реальным процессам фильтрации доказана сравнением результатов расчёта на ЭВМ с экспериментами НИИОГаза по методике 6.СЭВ по шести различным тканям (табл. 2).

Для расчёта и экспериментов использовалась кварцевая стандартная пыль при $d_{50} = 1,75$ мкм и $\sigma = 2,5$ с плотностью 2650 кг/м³. Начальная запылённость составляла 10 г/м³ при скорости фильтрации $0,02$ м/с. Периодичность регенерации составляла 300 с путем обратной продувки в течение 10 с. Сравнение показало высокую сходимость расчётных и экспериментальных данных при отклонении по степени очистки в пределах $0,004 - 0,05$ % и потерям напора от $0,5$ до $36,6$ %.

Разработан типовой бланк исходных данных для расчёта и "Инструкция по использованию пакета программ CF.EXE".

Математическая модель для волокнистых фильтров аналогична таковой для тканых материалов в рукавных фильтрах, но имеется и ряд существенных отличий. Основное из них в том, что для волокнистых фильтров всегда $r_{\text{в.и}} \approx 1$.

Таблица 2

Проверка модели на адекватность

Тип ткани	Сравниваемые параметры	Значения		Отклонение, ± %
		на стенде НИИОГаза	Расчёт на ЭВМ	
Лавсановая арт. 86031	степень очистки потери напора, Па	0,99860 3900	0,999864 3878	+ 0,004 - 0,05
Фильтра - 550	степень очистки потери напора, Па	0,99992 3560	0,99998 3731	+0,006 + 4,6
Оксалоновая ТТО - 3	степень очистки потери напора, Па	0,99880 3500	0,99840 4685	- 0,04 - 25,4
Полушерстяная ЦН	степень очистки потери напора, Па	0,99900 3300	0,99870 3105	- 0,03 - 5,9
Стеклоянная ТСФТ - 2	степень очистки потери напора, Па	0,99600 3600	0,99550 5278	- 0,05 + 35,6
Лавсановая арт. 217	степень очистки потери напора, Па	0,99990 2800	0,99974 4413	- 0,03 + 36,6

Для волокнистых материалов расчёт по-фракционной очистки газа при фильтрации через пылевой слой выполнен в интегральной форме (для тканевых расчёт велся по среднему числу слоёв). Введено понятие удельной пылеёмкости $\Pi_{уд}$ (кг/м²·м), позволяющее корректировать фактическую пылеёмкость в конкретных условиях фильтрации.

Для волокнистых неколандрированных (термически необработанных поверхностей) материалов самым важным показателем является их пылеёмкость Π (кг/м²). Различают стандартную и фактическую пылеёмкость. Последняя в сравнении с исследованиями Ю.П.Хлебникова (ВНИИКондиционер) скорректирована учётом показателя профилированности волокна $K_{пр}$, коэффициентами взаимовлияния волокон $K_{в.в}$ и неравномерности покрытия волокон пылинками σ_n :

$$\Pi = 0,25\rho_n d_g F_s (1 - \varepsilon_{n,n}) \sigma_n K_{в.в} (\Delta P^2 / \Delta P_{тк}^2 - 1) / K_{пр} \text{ кг/м}^2, \quad (29)$$

где d_g - диаметр волокна, м; F_s - удельная поверхность ткани м²/м², ΔP - конечное сопротивление фильтроматериала, Па; при эксплуатации фильтра обычно ΔP доводится до располагаемого давления P_p . Если задана периодичность замены фильтроматериала P_z (час), то формула (29) значительно упрощается до вида

$$\Pi = 0,95 Z_n \cdot g \cdot P_z \cdot 360 \text{ кг/м}^2, \quad (30)$$

где g скорость фильтрации, м/с; Z_n - начальная запылённость, кг/м³.

Зная Π , определяем конечное количество слоёв пыли, через которые будет фильтроваться пылевой поток:

$$n_{\text{сл.п.к}} = \frac{\Pi \sigma_n K_\phi}{0,524 d_{50}^0 \rho_n}, \quad (31)$$

где $0,524$ - плотность упаковки неуплотнённого слоя пыли при $Re \geq 1$; d_{50}^0 - средний диаметр пылинки, образующих слой пыли, м; K_ϕ - коэффициент формы пылинок.

При числах $Re < 1$

$$n_{\text{сл.п.к}} = \frac{\Pi}{(1 - \varepsilon_{n.n}) d_{50}^0 \rho_n} \quad (32)$$

Расчёт периодичности замены фильтроматериала, если она не задана, ведётся по формуле:

$$P_z = \frac{S_\phi \cdot \Pi}{L \cdot Z_n \cdot \Xi}, \quad \text{час} \quad (33)$$

В сравнении с плотными ткаными материалами, используемыми для очистки сильно запылённых газов, иначе рассчитывается средняя степень очистки за время между очередными заменами фильтроматериала. Для приточной вентиляции располагаемое давление мало и не превышает 500 Па, пыль накапливается медленно и рассредоточено по толщине ткани. Поэтому такой рыхлый слой имеет малое сопротивление, а число улавливающих пыль пылевых слоёв исчисляется единицами, а иногда и менее 1. Для каждого случая выведены свои формулы.

Адекватность модели реальным условиям доказана сравнением расчётных на ЭВМ и экспериментальных данных, выполненных ВНИИКондиционером (г. Харьков). Эксперименты охватывали 33 образца иглопробивных волокнистых фильтроматериалов, различающихся толщиной, поверхностной плотностью, составом смеси волокон, их диаметром, плотностью упаковки и профилированностью волокон. Сравнение велось по четырём параметрам: сопротивлению чистого фильтроматериала, воздухопроницаемости, пылеемкости и средней степени очистки. Для всех фильтроматериалов, кроме трёх двухслойных, среднее отклонение от эксперимента по сопротивлению ткани составило 17,6, воздухопроницаемость - 9,9, пылеемкость - 16,5 и степень очистки в абсолютных величинах 1,1 %. Отклонения наблюдаются в обе стороны, что говорит о случайности их появления.

По плотным тканям типа Фильтра-550 также достигнут высокий уровень адекватности. По эффективности отмечены значения, равные 99,91 против 99,93 %, а по сопротивлению материала - 3857 против 3560 Па. Для фильтроматериалов типа ФПП по эффективности достигнута полная адекватность (99,99 % в обоих случаях).

На основе разработанной модели составлены алгоритмы и пакет из программ VVF, VOLF, BLANK, VVFINS, STAL, используемых для выбора фильтроматериалов или разработки их оптимальных структур, а также режимов работы волокнистых фильтров.

Для удобства использования пакета программ разработан бланк-заказ исходных данных и Инструкция пользователя. Пакет программ передан заказчику - институту Союзпроектверфь (г. Санкт-Петербург) для практического использования.

5. Механизм очистки газов в инерционных аппаратах

До настоящего времени приемлемой для практических расчётов теории очистки воздуха от пыли в циклонах не было, хотя известно более десятка аналитических решений. Пять из них, разных по первоначальным предположкам, были проанализированы в отношении к циклонам типа ЦН различных типоразмеров. Определялся минимальный улавливаемый диаметр пылинок. Лучшие результаты были получены для формулы Дэвиса, в которой наиболее полно учтена геометрия унифицированного циклона.

Согласно теории Дэвиса частица движется вдоль кольца в режиме свободного вихревого потока, а время пребывания частицы в циклоне зависит от его объёма. Поэтому расчётные формулы как по степени очистки, так и сопротивлению циклона включают практически все конструктивные размеры относительно основного - его внешнего диаметра.

Известны десятки типов циклонов разной формы с различным соотношением отдельных его элементов, с тангенциальным и спиральным вводом, с улиткой и без неё на выходе, с конусом-коагулятором и пр.

Расчёт степени очистки в инерционных аппаратах (моделях) построен на по-фракционном принципе сравнения размера пылинки (её фракции) с минимальным (критическим) диаметром, улавливаемом в аппарате, т.е с соблюдением условия $d_{n_i} > d_{кр,j,z}$. Размер пылинок и их массовая доля рассчитывались исходя из предположения о логнормальном распределении пыли по размерам.

Вероятностная блок схема для сухих инерционных аппаратов, в том числе циклонов, приведена на рис. 3.

Согласно рис. 3 осаждение пылинок в аппаратах возможно за счёт инерционных сил с вероятностью $r_{ин} = r_{цб}$ (для циклонов), диффузионного (r_d), турбулентного (r_m) и электростатического осаждения ($r_э$), а также гравитационных сил с вероятностью $r_{гп}$. В общем виде эффективность очистки в таких аппаратах может быть представлена в виде трёх слагаемых:

$$\mathcal{O}_{oc} = r_{цб} + (1 - r_{цб}) \max\{r_{д}; r_{м}; r_{э}\} + (1 - r_{цб})(1 - \max\{r_{д}; r_{м}; r_{э}\}) r_{зр} \quad (34)$$

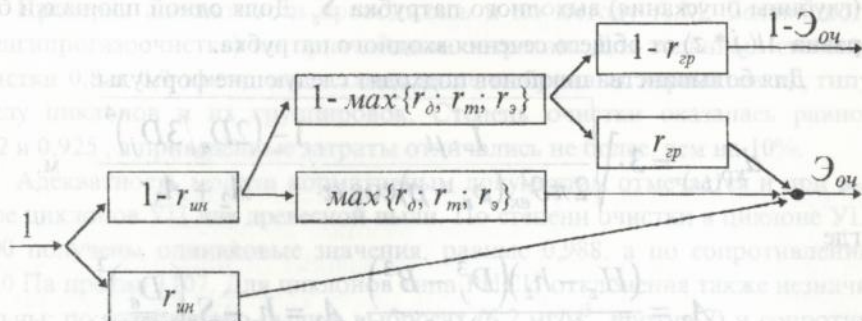


Рис. 3. Вероятностная блок-схема расчёта эффективности инерционных пылеуловителей

Анализ выражения (34) показывает, что если доля влияния диффузионного, турбулентного и электростатического осаждения мала, а силы гравитации не могут проявиться из-за высоких скоростей движения потока, то $\mathcal{O}_{oc} = r_{цб}$. Этот случай характерен для циклонов, где преобладающими являются центробежные силы. Если скорость потока будет мала, а размеры пылинок велики, то пылеулавливание будет осуществляться за счёт сил гравитации. И поэтому при соответствующем конструктивном оформлении аппарата мы приходим к пылеосадочным камерам. Для малых скоростей потока и высокой электростатической напряжённости поля можно говорить об электрофильтрах. Возможны также и другие варианты сухих пылеуловителей, к которым будет приемлема рассмотренная вероятностная блок-схема.

Эффективность очистки в инерционных (циклонных) пылеуловителях рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{O}_{oc} = \sum_{i=N_{дкр}}^N n_i, \quad (35)$$

где $N_{дкр}$ - номер фракции, соответствующий минимальному (критическому) диаметру пылинок, улавливаемых в циклоне за счёт центробежных сил.

Критический диаметр для циклонов определяется с учётом координатного расположения по осям j и z условно выделенной доли газового потока во входном патрубке. Количество расчётных струй (потоков) равно произведению числа полосок $j \cdot z$ по ширине и высоте патрубка. При этом для каждой площадки в сечении характерны разные значения условного

расчётного диаметра D_j ; общей H_z , цилиндрической h_z , а также высоты (глубины опускания) выходного патрубка S_z . Доля одной площадки будет равна $1/(j \cdot z)$ от общего сечения входного патрубка.

Для большинства циклонов подходят следующие формулы:

$$d_{\text{кр}(j,z)} = 3 \cdot \sqrt{\frac{L \cdot \mu}{2\pi g_{\text{вх}}^2 (\rho_n - \rho) \cos \alpha} \cdot \frac{1 - (2D_6/3D_j)^4}{A_2 + A_3}} \quad \text{м}, \quad (36)$$

где

$$A_2 = \frac{(H_z - h_z)(D_j^3 - B^3)}{(D_j - B)D_j^2}, \quad A_3 = h_z - S_z \left(\frac{D_6}{D_j} \right)^2.$$

В этих формулах: L - объём газа, $\text{м}^3/\text{ч}$; j, z - координаты расположения пылинки во входном патрубке; $g_{\text{вх}}$ - входная скорость, $\text{м}/\text{с}$; α - угол наклона входного патрубка, град; D_6 - диаметр входного патрубка, м ; B - диаметр выпускного для пыли отверстия, м .

Соппротивление циклона в модели рассчитывается по методу Стейрманда, суммирующему потери давления на характерных участках газового тракта, а именно: на входе в циклон, выходе и внутри его. Основным параметром в формуле является площадь внутренней поверхности циклона, соприкасающаяся с газами. Расчёт давления по этому методу ведётся с точностью до 10% для рассматриваемых 18 типов циклонов.

В соответствии с моделью разработаны алгоритм и программа CYCLON, позволяющая производить выбор и технико-экономическую оптимизацию набора вариантов из 18 типов, 16 типоразмеров и 5 группировок циклонов для 19 различных видов пылей. Возможны варианты расчёта с любыми другими аэрозолями под индексом "Пыль заказчика". Кроме того, сравнение идёт по 6 - 10 значениям входной скорости потока. Варианты сравнивались с учётом выделенной строительной площади под установку пылеочистного и вентиляционного оборудования и без неё при различных вариантах выгрузки пыли из циклонов.

Адекватность модели реальным процессам устанавливалась сопоставлением рассчитанных на ЭВМ результатов с данными нормативного выбора циклонов согласно "Указаниям по расчёту циклонов" для аппаратов НИИОГаза и ЛИОТ, а также для циклонов РИСИ и УЦ в соответствии с документами Госстроя Б.СССР. Для сравнения использовалась кварцевая стандартная пыль с параметрами $d_{50}=16 \text{ мкм}$ и $\sigma=3$ концентрацией $10 \text{ г}/\text{м}^3$ при стандартных климатических условиях.

Сравнение показало, что отклонения по эффективности не превышают

1-3% (относительное отклонение до 20%) при равенстве потерь давления.

Проверка адекватности проводилась и по методу А.М. Бежавицкого (Ленгипрогазоочистка) по приведённым затратам. Для заданных степеней очистки 0,8 и 0,9 имело место совпадение выбранных вариантов по типу, числу циклонов и их группировок. Степень очистки оказалась равной 0,82 и 0,925, а приведённые затраты отличались не более, чем на 10%.

Адекватность модели нормативным документам отмечается и при выборе циклонов УЦ для древесной пыли. По степени очистки в циклоне УЦ-1500 получены одинаковые значения, равные 0,988, а по сопротивлению 1110 Па против 1107. Для циклонов типа РИСИ отклонения также незначительны: по содержанию пыли в выбросах ($6,2 \text{ мг/м}^3$ против 7) и сопротивлению (730 Па против 719).

Такая высокая адекватность позволила рекомендовать выбор и расчёт режимов работы циклонов вести с помощью программы CYCLON на ПЭВМ. При этом выбор оптимального варианта предусматривает обеспечение требуемой или большей степени очистки при минимальных затратах на очистку заданного объёма очищаемого газа. Экономические расчёты учитывают капитальные затраты, включая стоимость здания, текущие расходы на электроэнергию и обслуживание циклона.

По результатам сравнения вариантов (возможное их число до 20000) формируется паспорт проектируемой вентсистемы для выбранного типа циклона, состоящей из 33 параметров, включая 10 по исходным данным, 8 технологических, 5 конструктивных и 10 экономических. Этот паспорт является окончательным документом расчёта. Программа CYCLON в виде записи на магнитной дискете передаётся пользователю вместе с "Бланком заказа исходных данных" и "Инструкцией для пользователя".

Пакет программ CYCLON из 6 версий внедрён более, чем в 10 проектных организациях, некоторых ВУЗах и прочих учреждениях. Объём внедрения практически не ограничен, любая заинтересованная организация готова приобрести такие программы, но дело в оплате услуг.

Экономический эффект при расчёте на ЭВМ циклонных установок только за счёт оптимального выбора варианта составляет от 3 до 10 руб. на каждый млн. м^3 очищенного газа. Для цеха с объёмом выбросов в 500000 $\text{м}^3/\text{ч}$ (среднего по масштабам производства) и двухсменной работе годовая экономия будет равна 7,2-24 тыс. рублей в ценах 1989 г.

Совершенствование программы CYCLON может идти по пути расширения банка данных аэрозолей и типов циклонов.

Примером прицельности вероятностного метода моделирования является и программа (методика) расчёта на ПЭВМ эффективности и режима работы малогабаритного фильтро-вентиляционного агрегата МФА, пред-

назначенного для очистки сварочного аэрозоля. Учитывая трёхступенчатую очистку воздуха от пыли, общая и по-фракционная эффективности очистки представлены выражениями:

$$\Xi = \sum_{i=1}^N \Xi_i \cdot n_i, \text{ где } \Xi_i = 1 - (1 - \Xi_{I_i})(1 - \Xi_{II_i})(1 - \Xi_{III_i}). \quad (37)$$

В этих формулах $\Xi_{I_i}, \Xi_{II_i}, \Xi_{III_i}$ эффективности очистки воздуха от пыли i -ой фракции в первой, второй и третьей ступенях очистки, доли.

Первая ступень (искрогаситель) работает на принципе инерционного сепарирования пыли. Её эффективность зависит от минимального улавливаемого диаметра пылинок в зазорах между жалюзи искрогасителя, наклонённых к потоку под углом 30° . Улавливаемый диаметр пылинок рассчитывается по формуле

$$d_{n,\min j} = \sqrt{\frac{18\mu_m v \cdot v_j \tan \beta}{\vartheta_I \rho_n (v + \delta)} \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{18\mu_m v \left(1 - \frac{v_j}{\cos \beta} \right)}{\vartheta_I \rho_n (v + \delta) d_{I50}^2} \right) \right]^{-1}}, \quad (38)$$

где l, δ - длина и толщина жалюзи в метрах, м; v - ширина зазора между жалюзи, м; β - угол наклона жалюзи, град; v_j - расстояние до середины j -го участка в зазоре, м; μ_m - вязкость газа при температуре T , Па·с; ϑ_I - скорость потока перед жалюзи, м/с; d_{I50} - среднегеометрический размер пылинок в первой ступени, м.

Вторая ступень очистки основана на фильтрации воздуха через тканые и волокнистые материалы. Математическое описание этих ступеней рассмотрено выше. Третьей ступенью агрегата МФА является каркасный фильтр, обтянутый тканью Петрянова ФПП-15, которая по своей структуре относится к войлочным материалам, состоящим из k_{III} слоёв волокон.

Учитывая, что $k_{III} = \beta_{III} h_{III} / d_{v_{III}}$, эффективность улавливания i -ых пылинок в третьей ступени будет равна

$$\Xi_{III_i} = 1 - (1 - \Xi_{III_{e_i}})^{k_{III}}, \quad (39)$$

где β_{III} - плотность упаковки волокон в материале ФПП; h_{III} - толщина материала ФПП, м; $d_{v_{III}}$ - диаметр волокон третьей ступени, м.

Программа SWARKA разработана на языке FORTRAN и TURBO-BASIC с объёмом текста 50 кбайт. Время одного расчёта составляет 80с.

Проверка достоверности расчёта реальным условиям проводилась в лаборатории ВНИИЭСО проволокой СВ-08Г2С диаметром 2 мм в углекис-

дом газе с помощью полуавтомата ПДГ-502. Аппарат МФА-1 испытывался в комплекте со сварочной горелкой на 500А, имеющей встроенный местный отсос, соединённый с аппаратом гофрированным шлангом диаметром 32 мм. Испытания проводились при объёме отсоса $60 \text{ м}^3/\text{ч}$ в течение 9 часов. Пробы сварочной пыли отбирались до фильтра, после I и II ступеней очистки и в зоне дыхания сварщика. Статическое давление измерялось после II и III ступеней очистки. Конечное сопротивление со встроенным отсосом составило 8000, отдельно аппарата - 6800 (II ступень), и только рукавного фильтра - 4000 Па.

Результаты сравнения сведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительные результаты испытаний аппарата МФА-1

Параметры	Единицы измерения	Значение параметров	
		по расчёту на ЭВМ	по эксперименту
Эффективность очистки по ступеням:			
- первой (искрогаситель)	%	21,8	18 - 39
- второй (рукавный из ткани Лавсан Арт. 86033)	%	97,4	96 - 97
- третьей (волоконный из ткани ФПП-15)	%	95,1	-
Общая эффективность очистки	%	99,9	99,6 - 99,8
Начальная запылённость	$\text{мг}/\text{м}^3$	610	350 - 875
Конечная запылённость	$\text{мг}/\text{м}^3$	0,6	0,7 - 1,75
Периодичность регенерации	час	13,5	8

Сопоставление данных показало, что общие эффективности очистки близки (99,9 против 99,6-99,8%), а по ступеням очистки разнятся не более, чем на 29%. Практически совпадают и конечные запылённости газа. Требуемое время между регенерациями в пределах одной-двух смен.

Сравнение подтверждает адекватность аналитического расчёта реальным процессам очистки воздуха в малогабаритных аппаратах типа МФА-1. Разработанная модель, методика расчёта и программа на ЭВМ были использованы для расчёта оптимальных параметров работы и параметрического ряда пылеулавливающих аппаратов для различных условий сварки при минимальных энергозатратах на очистку воздуха от сварочного аэрозоля. Один из таких аппаратов был изготовлен и испытан на Выборском судостроительном заводе. Такой аппарат отличался гофрированной схемой

II ступени очистки и магнитным регенерационным устройством. (см. А.С. № 1623725 автора).

6. Теоретические основы предупреждения взрывов пыли в шахтах

Приводится описание механизма развития взрыва угольной пыли, источников её воспламенения, пылеобразующей способности углей в ряду метаморфизма, а также методики аналитического расчёта пылеотложения.

Впервые в горной практике получено воспламенение взвешенной угольной пыли фрикционными искрами при работе исполнительного органа комбайна с линейной скоростью резания 1,5 м/с и нагрузке на один зубок не более 5 кВт. Методом кинофотосъёмки установлено, что угольная пыль взрывается от воспламенения пиритной пыли, образующейся при резании включений колчедана в угольных пластах. При трении зубков о кварцсодержащий песчаник воспламенение угольной пыли возможно лишь при содержании метана в смеси 2,7% и выше.

Взрывозащиту от фрикционного искрения следует осуществлять распылённой водой с подачей её под каждый зубок форсунками или с помощью водовоздушных эжекторов, что удачно сочетается с пылеподавлением. Для предупреждения воспламенений предложен и подтверждён экспериментально критерий флегматизации среды, который для самых жёстких условий при резании песчаников должен быть не менее $3,6 \cdot 10^7 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град.})$. Рассчитывается этот критерий по формуле:

$$K_{\phi л} = \frac{0,25 D_c^2 C_{жс} \rho_{жс}}{K_c l^2 i g \alpha_2 D_k^2} \quad (40)$$

где $C_{жс}$ - теплоёмкость жидкости, Дж/кг·град; l - расстояние от форсунки до кромки зубка, м; K_c - коэффициент снижения скорости потока на расстоянии l .

Показано, что радиус факела у зубка должен не менее, чем в 3 раза перекрывать ширину режущей кромки и длину яркой части его следа.

Разработано "Техническое задание на проектирование системы взрывозащитного орошения с подачей воды на режущий инструмент (внутреннее орошение) для проходческих комбайнов с фрезерным исполнительным органом". Опытные образцы взрывозащитного орошения прошли промышленные испытания на шахтах.

В диссертации электростатизированные аэрозоли впервые рассматриваются как возможный источник воспламенения пылегазовоздушных смесей в угольных шахтах. Установлено, что естественная электростатизированность пы-

ли в ряду метаморфизма изменяется от 4600 до 96300 нКл/кг, а заряженность воды при обычном орошении не превышает 2000 нКл/кг.

Оценена взрывоопасность электрoзаряженных аэрозолей. Показано, что при орошении серийными форсунками нет опасности воспламенения. Опасны лишь электрoзаряженные пылевые аэрозоли. Оценить эту опасность можно по методике ЦНИИСЭТ. При удельной заряженности пыли 50000 нКл/кг и объёмах пылевого облака более 2 м³ могут воспламеняться пылеметановоздушные смеси как при выемке угля и прохождении выработок комбайнами, так и при ведении взрывных работ.

Разработан аналитический метод расчёта пылеотложения на выходе из очистных забоев, учитывающий пылеобразующую способность углей, режим проветривания забоя, тип выемочного механизма, наличие средств пылеподавления, длину и сечение лавы.

Горение и взрывы пылевоздушных смесей в угольных шахтах могут протекать по тепловой или радикально-цепной схемам. На этапе развившегося взрыва предпочтение отдаётся тепловой схеме. Добавки различных веществ могут нейтрализовать горючую смесь, проявляя себя как флегматизаторы или ингибиторы в зависимости от их химической природы. Флегматизаторы понижают температуру горения и тем самым предотвращают распространение взрыва. Ингибиторы, являясь химически активными добавками, тормозят реакции за счёт отрицательного теплового баланса или обрыва цепей.

Действие добавок зависит от стадии развития реакции. Наибольший расход их требуется в стадии развившегося взрыва. В этом случае роль флегматизаторов сводится к экранированию лучистой энергии фронта пламени. При увеличении добавки длина распространения взрыва L будет уменьшаться и, наконец, при достижении оптимальной концентрации флегматизатора D_ϕ смесь не будет воспламеняться. Следовательно при $L=0$ получена формула для определения D_ϕ (%) с учётом степени метаморфизма V^2 и содержания негорючих H в угле:

$$D_\phi = \frac{1}{C_\phi} \left[\frac{0,5cV^2}{\chi\rho} (100 - H) - C_2(100 - H) - \sum C_{n_i} H_i \right] \quad (41)$$

где C_ϕ, C_2, C_{n_i}, c - теплоёмкости флегматизатора, горючих и негорючих компонентов в угле (Дж/кг·град) и газов после взрыва, Дж/м³·град; χ - стехиометрическое содержание взрывчатых газов, %; ρ - плотность продуктов пиролиза угля, кг/м³.

Сходимость расчётных D_ϕ с опытными в штольнях МакНИИ (отклонения менее 20%) на примере угольных и сланцевых пылей с разным выхо-

дом летучих веществ позволяет рекомендовать формулу (41) для расчёта добавок флегматизаторов (инертной пыли, воды, растворов и др.), сравнения их по эффективности и оценки степени взрываемости различных пылей.

Эффективность мокрых способов пылевзрывозащиты зависит главным образом от скорости и полноты смачивания пыли по всей поверхности выработок. Ранее считалось, что воду без ПАВ невозможно эффективно применять для пылей, обладающих высокой гидрофобностью. При этом не учитывалось, что при орошении взаимодействие частиц пыли и воды обычно протекает в динамических условиях. При этом воздух вытесняется с внешней поверхности пылинок при растекании жидкости. Энергия смачивания пылинки определяется по формуле:

$$A_{см} = \sigma_{ж.в.д} (1 - \cos \Theta_d) \pi d_n^2, \text{ Дж} \quad (42)$$

Помимо межмолекулярных сил, на процесс смачивания пыли оказывают влияние внешние силы, которые в общем балансе энергии могут играть значительно большую роль, чем силы поверхностного натяжения. Причём, чем значительнее работа внешних сил $A_{вн}$, тем эффективнее процесс смачивания. Для электронейтральных жидкостей внешние силы определяются давлением жидкости у распылителя или его конструкцией. Полное смачивание пыли возможно лишь при условии, когда $A_{вн} \geq A_{см}$.

Минимальное давление жидкости, обеспечивающее полное смачивание, определяется из выражения:

$$P = \frac{0,116 \cdot 10^6 \sigma_{ж.з.д} (1 - \cos \Theta_d) d_n^2 D_c^4 a}{\rho_{ж} K^2 D_k^3} \text{ Па}, \quad (43)$$

где a -сопротивление распылителя, кг/м⁷; K - коэффициент снижения скорости капель.

Расчёты показывают, что для смачивания гидрофобной пыли коксующихся углей каплями воды без добавок ПАВ с помощью форсунки КФ-3,3-75 достаточно иметь давление перед оросителем 0,3 МПа. Из-за многообразия условий чётко определить границу целесообразности ПАВ при пылеподавлении не представляется возможным. Однако ясно, что в повышении давления функции ПАВ могут подменяться инерционными силами. Поэтому при давлении свыше 0,5 МПа (5 атм) применение ПАВ экономически не оправдано.

Проверка параметров смачивания пыли, полученных теоретическим путём, проводилась на шахтах им. Румянцева и Мушкетовская в Донбассе. Установлено, что при давлении воды 0,4 МПа и более с применением насадок, дающих компактную струю, за счёт напора жидкости можно эффективно смачивать отложившуюся пыль без смачивателя ДБ.

7. Оптимизация параметров орошения, уборки и связывания пыли

Основным параметром эффективности способов предупреждения взрывов является время защитного действия T . Отношение $T/T_n = S$ показывает, во сколько раз продолжительность эффективного действия способа больше времени накопления взрывоопасного количества пыли T_n .

Безразмерный показатель эффективности S может изменяться для различных способов от 0 до ∞ и позволяет дифференцировать способы на периодические, когда S принимает конечные значения, и непрерывные, когда S стремится к ∞ . Чем больше S , тем эффективнее способ. При осланцевании горных выработок $T_{осл} = T_n$, поэтому $S=1$. В связи с этим показатель S может служить и коэффициентом сравнения способов.

Взамен осланцевания были исследованы и рекомендованы к применению орошение растворами смачивателей, уборка пыли путём смыва её водой и водными растворами, побелка выработок цементно-известковым раствором, а также связывание пыли гигроскопическими составами и с помощью тумана. В основу теоретического расчёта параметров этих способов положены уравнения водных балансов на единице поверхности выработки. Время защитного действия описывается уравнением

$$T_{op} = \frac{(W_1 - W_{дон})P_s}{q_{исп}}, \quad (44)$$

где W_1 , $W_{дон}$ - влажность слоя после орошения и минимально допустимая влажность пыли, %; $q_{исп}$ - интенсивность испарения влаги, $\text{кг/м}^3 \cdot \text{с}$; P_s - удельное пылеотложение, кг/м^2 . По результатам экспериментных взрывов $W_{дон} = 17\%$ для боков и кровли и 12% для почвы выработок.

Показатель эффективности орошения может изменяться в широких пределах. Наибольшая эффективность ($S_{op} > 1$) достигнута в выработках с высоким пылеотложением, в других - $S < 1$. Учитывая это, орошение приемлемо лишь в выработках с высоким и неравномерным пылеотложением. Время защитного действия чаще всего равно смене или менее, а с учётом неравномерности расхода влаги и особенно в глубоких шахтах менее одного часа. Поэтому орошение относится к кратковременным мероприятиям, например на время проведения взрывных работ. Механизм способов связывания пыли также основан на смачивании её различными жидкостями с использованием гигроскопических солей в таком количестве, чтобы в зависимости от климатических условий влажность поверхностного слоя постоянно поддерживалась не ниже предельно допустимой. Время защитного действия способов связывания рассчитывается по формуле:

$$T_{св} = \frac{(m_{жс} + m_n)k_1}{q_{усп} + 0,5m_{св}P_0R_3} c, \quad (45)$$

где $m_{жс}$ - расход жидкости на обработку 1 м² поверхности, кг/м²; k - коэффициент полезного использования жидкости; P_0 - интенсивность пылеотложения, кг/м²с; $m_{св}$ - удельный расход жидкости на связывание пыли, кг_н/кг_п; R_3 - эквивалентный радиус выработки, м; m_n - количество поглощённой влаги гигроскопическим раствором (кг/м²), равное

$$m_n = \beta_0 (P_{н.л} \varphi - P_{н.р}) \frac{T_{св}}{Z}, \quad (46)$$

где $\beta_0 = 0,085 + 0,0269$, м/с; Z - теплота парообразования, Дж/кг; $P_{н.л}$, $P_{н.р}$ - парциальные давления водяных паров в воздухе и над раствором, Па; φ - относительная влажность воздуха, %.

Показатель эффективности способа связывания равен

$$S_{св} = \frac{T_{св}}{T_n} = \frac{k_1 m_{жс} P_0}{\delta \left[q_{усп} + 0,5q_{св} P_0 R_3 - (P_{н.л} \varphi - P_{н.р}) \frac{\beta_0}{Z} \right]}, \quad (47)$$

где δ - нижний предел взрывчатости пыли, кг/м³.

Анализ выражений (45) и (47) показывает, что срок защитного действия способа в меньшей степени зависит от интенсивности пылеотложения и в большей от климатических условий. Чем выше влажность воздуха и меньше его температура, тем эффективнее способ. Показатель $S_{св}$ может изменяться от 0 до ∞ и при других равных условиях зависит от интенсивности пылеотложения. Поэтому данный способ целесообразно применять только в выработках с интенсивным пылеотложением и высокой влажностью воздуха, например на вентиляционных штреках вблизи лав.

Теоретический анализ позволяет правильно подбирать композиции составов по формулам:

$$P_{н.р} \leq P_{н.л} \varphi + \frac{Z}{\beta_0} \left(\frac{m_{жс} k_1}{T_{св}} - q_{усп} - 0,5q_{св} P_0 R_3 \right), \quad (48)$$

$$C_{Дж} = \frac{0,05\beta_0 T_{св}}{Z m_{жс}} \left(P_{н.л} \varphi - P_{н.р} - \frac{q_{усп} Z}{\beta_0} \right) \quad (49)$$

Рассчитав $P_{н.р}$, по таблицам подбираем необходимый состав и его концентрацию, а затем находим минимальную добавку ПАВ к раствору так, чтобы его концентрация в течение всего срока не снижалась менее 0,05%. Для увеличения количества удерживаемого состава на поверхности

увеличивают его вязкость. В качестве загустителя используют хлорид магния и известковое молоко. По условиям токсичности, дефицитности и растворимости в воде предпочтение отдаётся растворам хлорида кальция и на их основе смачивающе-связующим пастам.

Исследования показали, что расход раствора хлорида кальция составляет 0,5-1,0, а пасты - 3-5 кг/м² поверхности выработок. Периодичность нанесения составов зависит от интенсивности пылеотложения и относительной влажности воздуха. Время защитного действия растворов в 5-45 и пасты 12-133 раза больше времени взрывоопасного накопления пыли. Гигроскопические составы рекомендуется применять на вентиляционных штреках вблизи лав при интенсивности пылеотложения от 50 до 370 г/м³ сут. и относительной влажности воздуха более 85%.

Принцип самого простого и надёжного способа пылевзрывозащиты обмывки заключается в периодической мокрой уборке пыли путём смыва её с поверхности выработок, не допуская взрывоопасного накопления несвязанной угольной пыли. При таком способе уборки одновременно происходят два процесса: смачивание и смыв увлажнённой пыли потоком жидкости на почву. В отличие от орошения смывать пыль выгоднее водой без ПАВ, так как несколько больший расход жидкости на смачивание способствует лучшему смыву пыли.

Показатель эффективности смыва равен

$$S_{см} = \frac{T_{св} P_0}{\delta} + 1 = \frac{0,4 m_{см} P_0}{(q_{исч} + 0,5 q_{св} R_3 P_0) \delta} + 1 \quad (50)$$

Из выражения (50) следует, что $S_{см}$ во всех случаях больше единицы. Наибольшее влияние на него при одинаковых горнотехнических условиях оказывают интенсивность пылеотложения и климатические параметры.

Изменение фактической периодичности обмывки в зависимости от пылеотложения P_0 при разной относительной влажности воздуха ϕ для ряда шахт Донбасса показано на рис. 4.

Теоретический анализ и фактические данные показывают, что максимальное время защитного действия смыва наблюдается при максимальной интенсивности отложения и высокой влажности воздуха. При наличии каплежидкости и влажности воздуха, близкой к 100%, наблюдается естественная связуемость угольной пыли. В этом случае $S_{см} \approx \infty$. Объясняется это конденсацией влаги из воздуха на поверхности выработки, когда температура пород меньше температуры проходящего воздуха.

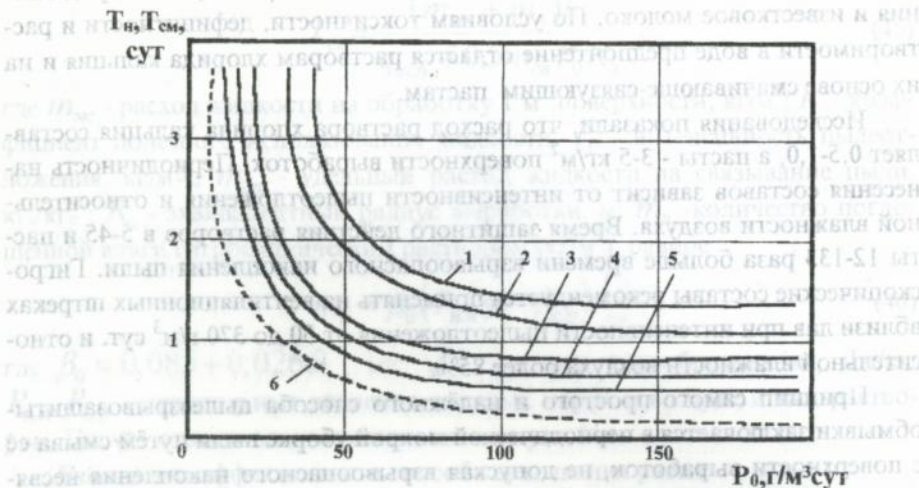


Рис. 4. Изменение времени запитного действия обмывки $T_{см}$ для шахт: 1, 2 - им. Румянцева ($\varphi=98$ и 97%); 3 - Мушкетовская ($\varphi=94\%$); 4 - им. Бажанова ($\varphi=91\%$); 5 - им. Калинина ($\varphi=83\%$); 6 - время накопления взрывоопасного количества пыли, сут.

Способ обмывки опробывался во всех выработках шахты им. Румянцева и участками длиной 150-300 м на других шахтах. Периодичность обмывки изменялась от нескольких минут до 6 месяцев и была в 1,1-6,9 раза больше времени накопления взрывоопасного количества пыли. Эффект от добавок ПАВ не превышал 50%, причём только при пылеотложении выше $25 г/м^3$ сут. Поэтому добавки ПАВ неэффективны при частоте обмывки через сутки и реже. Они рекомендуются только на погрузочных пунктах и призабойных участках выработки.

Промышленные испытания показали, что обмывку целесообразно применять при пылеотложении менее $50 г/м^3$ сут на участках длиной до 50 м один раз в сутки и реже, до 200 м - один раз в неделю и реже и свыше 200 м - механизированным способом один раз в месяц и реже. Побелку выработок цементно-известковым раствором рекомендуется применять при пылеотложении менее $0,3 г/м^3$ сут в главных откаточных, околоствольных выработках и в камерах 1 раз в квартал и через полгода. Расход побелочного раствора равен $0,6-0,8 л/м^2$.

Взрывозащитное действие орошения, связывания и смыва пыли проверялось диссертантом в условиях штольни и опытной шахты МакНИИ под руководством к.т.н. Петрухина П.М. и Нецепляева М.И. Установлены область и параметры эффективного применения предложенных способов.

8. Разработка способа непрерывного связывания пыли

Принципиально новый способ непрерывного связывания пыли с помощью тумана состоит в том, что туман за счёт турбулентной диффузии потока заполняет всё сечение выработки, смешивается с запылённым воздухом и уносится на значительное расстояние. Капли тумана, приходя в контакт с пылинками в соответствии с рассмотренной выше математической моделью, коагулируют с ними, в результате чего происходит увлажнение пылинок и более интенсивное их осаждение. Увлажнённые пылинки после оседания скрепляются между собой и поверхностью выработки.

Непрерывность связывания пыли ($S_{m,3} \approx \infty$) по всему периметру обеспечивается постоянным диффузионным осаждением тумана и увлажнённой угольной пыли. Вместе с тем за счёт тепло- и массообмена между воздухом и стенками выработки происходит увеличение влагосодержания его, испарение капель тумана, а также влаги с поверхности выработки. Это приводит к снижению эффективности связывания пыли, особенно на значительном удалении от завесы. Поэтому для обеспечения связывания пыли на всём протяжении выработки с интенсивным пылеотложением необходимо увеличивать производительность завес или (это лучше) устанавливать завесы рассредоточенно.

Получено, что интенсивность влагоосаждения определяется уравнениями:

$$\text{а) по всему периметру} \quad q = -\frac{Q}{P_1} \cdot \frac{dB_0}{dl} \quad (51)$$

$$\text{б) по почве} \quad q_n = -\frac{Q}{b} \cdot \frac{dB_2}{dl} \quad (52)$$

где Q - количество проходящего воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; P_1 - периметр выработки, м ; b - ширина выработки по почве, м ; B_2 , B_0 - массовые концентрации тумана, определяющие гравитационное и диффузионное осаждение, $\text{кг}/\text{м}^3$; l - расстояние от завесы, м .

Полное влагосодержание на почве составит $q_n + q$.

В выражениях (51) и (52) B_2 учитывает осаждение тумана на почву выработки под действием сил тяжести, а B_0 - осаждение за счёт диффузии по всему периметру выработки.

Условием надёжного и непрерывного связывания пыли является: по всему периметру, когда $q \geq q_{\text{исп}}$ и для почвы - $q_n \geq q_{\text{исп}}$. Исходя из этих условий были определены длины участков связывания пыли завесой:

а) по всему периметру

$$l = 0,155 \frac{R_0 S}{P_1} \sqrt[4]{\frac{d_{ок}}{\rho_{жс} g D_k^2}} \ln \frac{6,26 B_0 \sqrt[4]{\rho_{жс} g D_k^2}}{R_0 q_{исп}} \sqrt[4]{\frac{\rho_{жс} g D_k^2}{d_{ок}}} \quad (53)$$

б) по почве

$$l_n = \frac{H g}{g_{ос}} \ln \frac{B_0 g_{ос} S}{b H q_{исп}}, \quad (54)$$

где H - высота выработки, м; $g_{ос}$ - скорость оседания, м/с; R_0 - продольный калибр; $d_{ок}$ - ширина крепи, м; B_0, B_{ϕ} - начальные концентрации тумана для мелких и крупных фракций, кг/м^3 .

Производительность завес и дисперсность тумана определяется типом туманообразователей. По их характеристикам рассчитывается длина участка связывания пыли одной завесой и, наконец, необходимое число завес.

Способ связывания пыли исследовался на 5 шахтах Донбасса. Исследовались туманообразователи АСШУ-М, ФТ, ОП-1 и ТЗ. Завесы устанавливались на расстоянии 25-70 м одна от другой, первая завеса располагалась в 10-20 м от лавы. При подвигании лавы завесы переносились.

Длина участка связывания пыли всеми завесами составляла 110-190 м, а для первой из них 30-90 м. Участки связывания второй и последующих завес были на 10-30 м больше по сравнению с предыдущими.

На участке действия завес наблюдается усиленное пылеотложение увлажнённой пыли на расстоянии 15-120 м от лавы. За этим участком на расстоянии 100-350 м от лавы интенсивность пылеотложения снижается в 1,7-35 раз, а запылённость воздуха в 1,7-7,3 раза. Темп этого снижения сначала возрастает, а на расстоянии 200-300 м стабилизируется. Пылеотложение во всех случаях за зоной действия завес не превышало $2,1 \text{ г/м}^3 \text{ сут}$, которое вполне приемлемо для обмывки водой через 2 недели и реже.

Эффективное и непрерывное связывание пыли туманом отмечалось при пылеотложении до $480 \text{ г/м}^3 \text{ сут}$ и более. Масса влаги за счёт осаднения тумана в десятки и сотни раз превышает массу отлагающейся пыли, по этому способ можно применять при любом пылеотложении, но там, где имеется сжатый воздух.

9. Прогноз и разработка способов пылевзрывозащиты в глубоких шахтах

Анализ показывает, что относительная влагонасыщенность породного массива с глубиной уменьшается, достигая единицы, примерно, на глубине 760 м, и снижается до 0,8 на глубине 1200 м. При этом температура пород резко увеличивается, а относительная влажность воздуха снижается. В целом пылеобразующая способность углей и пылевзрывоопасность в выработках возрастают. Однако осушение воздуха и стенок выработок при по-

глощении влаги массивом за счёт разности парциальных давлений водяного пара в массиве и воздухе возможно лишь с глубин 1200 и более. Поэтому во всех выработках шахт глубиной до 1200 м, где не предусмотрено кондиционирование воздуха (КВ), мокрые способы пылевзрывозащиты остаются достаточно эффективными и могут применяться без ограничений.

На откаточном горизонте с КВ мокрые способы несовместимы с осушением воздуха при его охлаждении. Здесь должны применяться сухие способы, а именно: очистка от пыли исходящего воздуха, сухая механизированная уборка пыли, связывание пыли невысыхающими составами и завесы, распыляющие гигроскопические растворы.

Пылеулавливающие установки по габаритному фактору должны иметь мокрые пылеуловители центробежного типа (например ППУ-6), соединённые в батареи в зависимости от необходимой производительности установки. Предлагаются три типоразмера установок производительностью 300, 600 и 900 м³/мин.

Сухая уборка пыли может производиться путём предварительного взвихривания осевшей пыли с последующим улавливанием её. С учётом сил адгезии и аутогезии произведён расчёт основных параметров сухой пылеуборки и конструкции отдельных узлов агрегата.

Разработан способ непрерывного связывания пыли в конвейерных выработках с помощью рассредоточенных туманообразующих завес, периодически распыляющих гигроскопические растворы. Приведён пример расчёта параметров и режима работы завес. Для связывания пыли в условиях высоких температур и низкой влажности воздуха предложена специальная композиция на основе невысыхающего органического вещества - винипола ВД-2.

В этой же главе рассматриваются методология выбора способов, результаты их внедрения, а также социальное и экономическое сравнение взрывозащитных мероприятий.

Теоретический анализ и опыт пылевзрывозащиты в шахтах показали, что основными факторами, определяющими эффективность способов, являются: интенсивность пылеотложения, степень взрывчатости пыли, относительная влажность воздуха, его температура и глубина шахты. Эти же факторы определяют область целесообразного применения тех или иных мероприятий. Остальные 26 параметров, хотя и изменяются в широких пределах, заметного влияния на эффективность способов не оказывают. В рекомендациях о целесообразности или нецелесообразности применения способов пылевзрывозащиты, помимо эффективности, учитывались экономические и организационные факторы.

Экономическое сравнение способов приведено в табл. 4.

Таблица 4

Экономическое сравнение способов пылевзрывозащиты

Способ пылевзрыво-защиты	Показатель эффективности S	Относительная стоимость применения способа в сравнении с осланцеванием (1/сут) при пылеотложении, г/м ³ сут			
		1	50	200	500
Осланцевание	1	0,04	1	4	10
Смыв водой	1,03-3,4	0,005	0,13	2,7	3,8
Связывание растворами	1,14-36	0,53	0,53	0,68	1,7
Связывание пастой	1,84-210	0,84	0,84	0,84	1,2
Туманообразующие завесы	∞	0,29	0,29	0,29	0,29
Орошение раствором смачивателя ДБ	0,005-1,2	6,4	6,4	6,4	5,2
Побелка	1	0,12	3	12	30

За единицу оценки принята стоимость осланцевания выработки за одни сутки при среднем пылеотложении, равном 50 г/м³ сут и характерной для вентиляционных штреков вблизи лав.

Анализ данных показывает, что при малом пылеотложении следует применять обмывку выработок водой и побелку (лишь в отдельных случаях осланцевание), при интенсивности пылеотложения более 50 г/м³ сут - связывание растворами и туманообразующие завесы. При высоком пылеотложении лучше применять завесы, а где нет сжатого воздуха связывание гигроскопическими составами.

Социальный эффект за счёт снижения запылённости воздуха до санитарных норм рассчитывался по методике С.В.Медяника (ВостНИИ), равный для шахт им. Румянцева и Мушкетовская соответственно 6,8 и 6,3. Эти показатели характеризуют внедрённые мероприятия как высоко социально эффективные.

Опытно-промышленная проверка производилась в течение 1,5-2 лет на шахтах им. Румянцева и Мушкетовская. Общий экономический эффект для этих шахт составил 107,8 и 78,1 тыс. руб. в год.

По Минуглепрому Украины мероприятия по предупреждению взрывов пыли внедрены взамен осланцевания на 172 шахтах. В среднем по одной шахте эффект составлял 29,6 тыс руб. в год в ценах 1989 г. Общий экономический эффект от внедрения комплекса только на угольных шахтах Украины превышал 5 млн. руб в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Диссертация посвящена теоретическому обобщению и практическому решению проблемы обеспыливания промышленных выбросов и предупреждения взрывов угольной пыли в шахтах. Она имеет не только научно-техническое и народно-хозяйственное, но и важное социально-экологическое значение. Гидрообеспыливание воздуха, кроме трудоохранной и экологической функций, является первой линией защиты от взрывов пыли. Оно снижает интенсивность пылеотложения, а следовательно, и взрывоопасность горных выработок.

2. Для повышения эффективности пылеуловителей путём оптимизации режимов их работы предложен вероятностный метод моделирования массообменных процессов в полиаэродисперсных средах. Использование этого метода позволило для каждого пылеуловителя составить свои вероятностные блок-схемы протекания процессов и выразить их в виде цепочки формул. Это упрощает аналитическое описание самых сложных процессов и создание математических моделей, а также облегчает оптимизацию на ЭВМ режимов работы аппаратов.

3. Гидрообеспыливание впервые рассмотрено как пятистадийный вероятностный процесс взаимодействия пылинок с каплями. Стадии встречи, соприкосновения, удержания и захват пылинок каплями с последующим выпадением их из потока представлены как последовательные и независимые события, определяемые действием ряда параллельных процессов под влиянием различных сил. В результате аналитического описания вероятностной блок-схемы получена математическая модель гидрообеспыливания. Такая модель позволила составить алгоритм и пакет программ GIDROS для оптимизации шести основных параметров орошения.

Разработаны предложения по корректировке "Руководства по борьбе с пылью", обеспечивающие очистку воздуха до ПДК для протяжённых пылевых потоков и близких к ПДК (97-99%) для локальных источников пыли.

4. Изучен механизм распыливания жидкостей форсунками, получены аналитические зависимости для расчёта размеров капель, в основу которого положен энергетический баланс водного потока. Давление оказалось определяющим параметром. Исследованы параметры факела оросителей. Предложен безразмерный показатель эффективности орошения, характеризующий степень перекрытия сечения пылевого потока единицей массы жидкости в единицу времени. Чем выше этот показатель, тем эффективнее форсунка. Максимальный диаметр факела определяет конструктивное оформление системы орошения. Чем он больше, тем меньшим числом форсунок можно перекрыть сечение пылевого потока, тем меньший перерасход жидкости будет допущен при орошении. Лучшими являются конусные форсунки с большими углами раствора факела.

5. Показано, что вероятностный подход к моделированию универсален

и может быть использован для расчета на ЭВМ оптимальных параметров разных специфических систем орошения, например на обогатительных фабриках и сортировках, в скрубберах, трубах Вентури и др. Модель можно использовать и для оптимизации технологических процессов в химической промышленности, на предприятиях строительных материалов и др. отраслях, где происходят массообменные процессы в аэродисперсных средах.

На вероятностной основе уже разработаны математические модели очистки газов в инерционных и фильтрующих аппаратах (циклонах, жалюзийных решётках, рукавных и волокнистых фильтрах). Получены пакеты расчётных на ЭВМ программ для выбора пылеуловителей и оптимальных параметров их работы. Разработан параметрический ряд малогабаритных аппаратов для очистки сварочных аэрозолей.

5. Взамен малоэффективного осланцевания рекомендован комплекс мероприятий по предупреждению взрывов угольной пыли, основанный на применении воды. Установлено, что эффективность мокрых способов зависит от режима смачивания пыли. Доказано, что в динамических условиях можно обеспечить смачивание и уборку пыли водой без добавок ПАВ. Предложены формулы для расчёта параметров смачивания пыли.

Разработан аналитический метод расчёта интенсивности пылеотложения, исходя из пылеобразующей способности углей, режима проветривания длины лавы и др. факторов.

Изучен механизм флегматизации пылевоздушных смесей на разных стадиях развития взрыва, дан аналитический расчёт необходимой добавки флегматизаторов для предупреждения взрывов.

6. Предложен способ и научно обоснованы параметры непрерывного связывания пыли с помощью рассредоточенных туманообразующих завес. Установлено, что этот способ может эффективно применяться при любой интенсивности пылеотложения. Запылённость воздуха при работе завес снижается до ПДК.

7. Установлено, что электростатически заряженные аэрозоли могут воспламенять угольную пыль. При орошении с использованием серийных форсунок нет опасности воспламенения водными аэрозолями. Опасны пылевые аэрозоли. Так, при заряженности пыли свыше 50000 нКл/кг и объёмах пылевого облака более 2 м³ могут воспламеняться пылевоздушные смеси при выемке угля и прохождении выработок комбайнами, а также при ведении взрывных работ.

8. Изучен механизм взрывозащиты от фрикционных искр, что позволило впервые в горной практике получить воспламенение угольной пыли при трении зубков о пиритные включения в угле. Найден критерий флегма-

тизации среды от искрового воспламенения, равный $3,6 \cdot 10^7$ Дж/м⁵К. Разработано ТЗ на систему взрывозащитного орошения.

9. Разработан прогноз пылевзрывозащиты в глубоких шахтах. Учитывая снижение влагонасыщенности горного массива, рост пылеобразования и температуры пород с глубиной, мокрые способы могут эффективно применяться только до глубины 1200 м. Для глубоких шахт рекомендуется очистка от пыли исходящего воздуха и сухая уборка пыли специальными агрегатами. Предложены способы связывания пыли с использованием гигроскопических растворов.

Произведена экономическая и социальная оценка способов пылевзрывозащиты, рекомендованы рациональные области их применения. Показано, что внедрение комплекса с использованием воды снижает запылённость воздуха в выработках до уровня ПДК.

Положительные результаты опытно-промышленной проверки комплекса позволили внедрить его более, чем на 250 шахтах Донбасса, Львовско-Волынского бассейна, Грузии, Кузбасса и Караганды. Экономический эффект от внедрения составляет не менее 20-40 тыс. руб. в год в среднем на одну шахту (в ценах 1989 г.). Общий экономический эффект составляет не менее 5 млн. руб. в год.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях.

1. Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах /Л.М.Петрухин, М.И.Нецепляев, В.Н.Качан, В.С.Сергеев. - М.: Недра, 1974. - 304 с.
2. Физико-химические основы пылеподавления и предупреждения взрывов угольной пыли /В.И.Саранчук, В.Н.Качан, В.В.Рекун и др. - Киев: Наук. думка, 1984. - 216 с.
3. Химические вещества для борьбы с пылью /В.И.Саранчук, В.П.Журавлёв, В.И.Вейсенберг, В.Н.Качан, В.В.Рекун. - Киев: Наук. думка, 1987. - 180 с.
4. Временное руководство по предупреждению и локализации взрывов угольной пыли способами, основанными на применении воды /Л.М.Петрухин, М.И.Нецепляев, В.Н.Качан и др. -Макеевка-Донбасс: Ротапринт МакНИИ, 1970. - 24 с.
5. Нецепляев М.И., Качан В.Н., Быков А.М. Руководство по предупреждению взрывов пыли на шахтах Прибалтийского сланцевого бассейна /Макеевка-Донбасс, Ротапринт МакНИИ, 1970. - 24 с.
6. Каталог шахтопластов СССР по пылевому фактору /Л.Г.Ишук, Г.С.Гродель, Л.Я.Лихачёв и др. - М.: Изд. ИГД им. А.А.Скочинского, 1975. - 129 с.
7. Качан В.Н., Саранчук В.И. Предупреждение взрывов угольной пыли в глубоких шахтах -Киев: Техніка, 1990. - 156 с.
8. Современные способы борьбы с пылью /Л.М. Петрухин, М.И. Нецепляев, В.Н. Качан и др. - Донецк: ЦБТИ МУП УССР, 1987. - 120 с.
9. Шановская С.С., Смолякова С.И., Качан В.Н. Разработка основных положений по измерению запылённости воздуха при различных способах пылеподавления //Технология и экономика угледобычи. - 1964. - № 12. - С. 70.
10. Обмывка выработок взамен осланцевания на шахте Мушкетовская-Вертикальная /Ю.И.Баранов, П.М.Петрухин, М.И.Нецепляев, В.Н.Качан //Уголь Украины. - 1966,

- № 7 - С. 36-38.

11. Петрухин П.М., Нецепляев М.И., Качан В.Н. Предупреждение взрывов угольной пыли //Технология и экономика угледобычи. - 1966. - № 10. - С. 78-80.
12. Петрухин П.М., Качан В.Н. Способ непрерывного связывания угольной пыли с помощью рассредоточенных туманообразующих завес //Безопасность труда в промышленности. - 1967. - № 6. - С. 32-34.
13. Исследование возможности замены осланцевания и сланцевых заслонов мокрыми способами /П.М.Петрухин, М.И.Нецепляев, В.Н.Качан и др. //Материалы XIX пленума республиканской комиссии по борьбе с силикозом. - Киев : Наук. думка, 1968. - С. 103-104.
14. Исследование параметров смачивания угольной пыли в горных выработках /П.М.Петрухин, М.И.Нецепляев, В.Н.Качан и др. //Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1969. - № 7. - С. 24-26.
15. Результаты испытаний комплекса мероприятий по предупреждению взрывов угольной пыли, основанного на применении воды /Э.Н.Теличко, И.М. Кубанов, П.М.Петрухин, М.И.Нецепляев, В.Н.Качан //Уголь. - 1969. - № 2. - С. 49-52.
16. Исследование возможности предупреждения и локализации взрывов угольной пыли способами, основанными на применении воды /П.М.Петрухин, М.И.Нецепляев, В.Н.Качан и др. //Вопросы безопасности в угольных шахтах. Труды МакНИИ. - М. : Недра, - 1969. - № 20. - С. 128-140.
17. Опыт применения способов пылевзрывозащиты, на использовании воды /П.М.Петрухин, М.И.Нецепляев, В.Н.Качан, А.И.Колчинский //Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1970. - № 9. - С. 13-16.
18. Прокопovich В.В., Нецепляев М.И., Качан В.Н. Исследование пылевзрывоопасности и разработка рекомендаций по предупреждению взрывов пыли на шахтах Прибалтийского сланцевого бассейна //Горючие сланцы. - 1970. - № 2. - С. 5-10.
19. Качан В.Н., Колчинский А.И., Кулиш В.И. Испытания мероприятий по пылевзрывозащите Прибалтийского сланцевого бассейна //Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1971. - № 8. - С. 7-8.
20. Качан В.Н., Сергеев В.С. Современные способы борьбы со взрывами угольной пыли в шахтах //Рекомендации семинара-совещания работников шахтостроительных организаций по технике безопасности и культуре производства. - Кемерово, 1970. - С. 46-52.
21. Петрухин П.М., Качан В.Н. Теоретические основы пылевзрывозащиты способами, основанными на применении воды //Безопасность труда в угольных шахтах. Труды МакНИИ. М. : Недра, 1972. - Т. XXII. - С. 89-104.
22. Качан В.Н., Колчинский А.И., Кулиш В.И. Пылевзрывозащита на шахтах Прибалтийского сланцевого бассейна //Экспресс-информация о передовом опыте. М. : ЦНИЭИуголь, 1971. - Вып. 4-5. - С. 12-14.
23. Качан В.Н., Колчинский А.И., Кулиш В.И. Оценка пылевзрывоопасности горных выработок при проведении их комбайнами //Борьба с газом, пылью и выбросами в угольных шахтах. - Макеевка-Донбасс, 1973. - Вып. 9. - С. 109-112.
24. Исследование пылевзрывоопасности и разработка рекомендаций по пылевзрывозащите шахт Прибалтийского сланцевого бассейна /М.И.Нецепляев, В.Н.Качан, А.И.Колчинский, В.И.Кулиш //Безопасность труда в угольных шахтах. Труды МакНИИ. М. : Недра, 1972. - Т. XXII. - С. 81-89.
25. Агрегат для побелки, обивки горных выработок и нанесения смачивающе-связующих составов /П.М.Петрухин, М.И.Нецепляев, В.Н.Качан, И.Г.Попов //Экспресс-информация "Новое горношахтное оборудование и аппаратура, испытания и опыт эксплуатации". - ЦНИЭИуголь. - 1972. - № 7. - С. 37-39.
26. Качан В.Н., Колчинский А.И., Кулиш В.И. Снижение запылённости воздуха и пылеотложения при ведении взрывных работ с пеной //Борьба с газом, пылью и выбросами в угольных шахтах. - Макеевка, 1972. - № 8. - С. 116-122.
27. Петрухин П.М., Качан В.Н., Колчинский А.И. Уточнение предохранительной среды из пены //Безопасность взрывных работ в угольных шахтах. - Макеевка: 1972. - № 3.

- С. 124-130.
28. Качан В.Н., Колчинский А.И., Кулиш В.И. Исследование пылевзрывоопасности при проведении выработок комбайнами //Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1975. - № 5. - С. 20-21.
 29. Петрухин П.М., Качан В.Н., Колчинский А.И. Воздушно-механическая пена как средство борьбы с пылью при взрывных работах //Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1973. - № 5. - С. 6-7.
 30. Качан В.Н., Колчинский А.И., Кулиш В.И. Оценка пылевзрывоопасности горных выработок при проведении их комбайнами //Борьба с газом, пылью и выбросами в угольных шахтах. - Макеевка: - 1973. - № 9. - С. 109-112.
 31. Божко В.Л., Качан В.Н., Клишкань А.Ф. Эффективность пены как предохранительной среды при ведении взрывных работ в забоях подготовительных выработок //Уголь Украины. - 1974. - № 2. - С. 40-42.
 32. Качан В.Н., Кочерга Н.Г., Колчинский А.И. Воспламенение угольной пыли фрикционными искрами при работе проходческих комбайнов //Безопасность труда в промышленности. - 1974. - № 10. - С. 50-51.
 33. Качан В.Н., Колчинский А.И., Кочерга Н.Г. Воспламенение угольной пыли фрикционными искрами //Безопасность взрывных работ в угольных шахтах. - Макеевка, 1974. - № 5. - С. 69-72.
 34. Качан В.Н., Гончаров В.А., Плоскоголовый Е.П. Аналитический расчёт параметров осландцевания горных выработок //Горный журнал. Известия ВУЗов. - 1974. - № 12. - С. 63-68.
 35. Качан В.Н., Колчинский А.И., Кулиш В.И. Исследование пылевзрывоопасности при проведении выработок комбайнами //Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1975. - № 5. - С. 20.
 36. Качан В.Н., Коренев А.П. Определение среднего размера капель при распылении жидкости унифицированными форсунками //Борьба с газом, пылью и выбросами в угольных шахтах. - 1976. - № 11. - С. 114-119.
 37. Качан В.Н., Коренев А.П., Тришкин В.А. Опесыливание воздуха исходящего из очистных забоев крутых пластов Донбасса //Борьба с силикозом - М.: Наука, 1976. - № 10. - С. 30-37.
 38. Качан В.Н., Кочерга Н.Г., Петрухин П.М. Механизм воспламенения угольной пыли фрикционными искрами //Физика горения и взрыва. - 1976. - № 2. - С. 302-304.
 39. Дерюгин В.В., Качан В.Н. К вопросу предупреждения взрывов пылегазовоздушных смесей //Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Межвузовый сб. трудов. - Л.: ЛИСИ, 1978. - С. 9-15.
 40. Об электростатической безопасности форсунок с безискровой подзарядкой воды /В.Н.Качан, П.С.Залесский, В.И.Саранчук, С.А.Ихно //Способы и средства безопасной эксплуатации электромеханического оборудования в шахтах. - Макеевка-Донецк, 1982. - С. 13-17.
 41. Оценка взрывобезопасности форсунок с безискровой подзарядкой воды /В.Н.Качан, В.И.Саранчук, П.С.Залесский, Д.И.Зеляев //Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1981. - № 4. - С. 22-24.
 42. Саранчук В.И., Качан В.М. Оцінка і вибір засобів вибухозахисту від фрикційного іскріння за ступенем їх надійності при роботі прохідницьких комбайнів //Вісник Академії наук Української РСР. 1983. - № 2. - С. 54-62.
 43. Качан В.Н., Саранчук В.И., Юдин И.А. Об электростатической безопасности водных аэрозолей в угольных шахтах //Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1983. - № 4. - С. 26-27.
 44. Саранчук В.И., Качан В.Н. Об электростатической взрывоопасности пылевых и водных аэрозолей в угольных шахтах //Уголь Украины. - 1983. - № 8. - С. 42-44.
 45. Медведев Э.Н., Саранчук В.И., Качан В.Н. Пылеобразующая способность углей в ряду метаморфизма //Уголь Украины. - 1984. - № 8. - С. 32-33.
 46. Качан В.Н. Роль поверхностно-активных веществ при гидрообеспыливании //Изменение свойств угля при химических и физических воздействиях. - Киев.: Наук.

думка, 1984. - С. 72-83.

47. Качан В.Н., Яковлев В.С., Макальский Л.М. Опасность электростатического аэрозоля //Безопасность труда в промышленности. - 1985. - № 6. - С. 37-38.
48. Качан В.М. Зв'язування вугільного пилу в шахтах гігроскопічним туманом //Вісник Академії наук Української РСР. 1985. - № 2. - С. 44-51.
49. Качан В.Н., Саранчук Е.В. Математическая модель гидрообеспыливания воздуха в горных выработках //Горный журнал. Известия ВУЗов. - 1986. - № 1. - С. 68-70.
50. Качан В.Н. Прогноз пылевзрывозащиты в глубоких шахтах //Безопасность труда в промышленности. - 1986. - № 3. - С. 47-49.
51. Качан В.Н., Саранчук Е.В. Расчёт размера капель при работе центробежных форсунок //Борьба с силикозом - М.: Наука, 1986. - Т. XII. - С. 56-62.
52. Качан В.Н., Саранчук В.И., Рекун В.В., Карагодин Л.Н. Использование электробаланса для повышения эффективности борьбы с пылью //Безопасность труда в промышленности. - 1986. - № 7. - С. 36-38.
53. Качан В.Н. Вероятностная блок-схема гидрообеспыливания воздуха //Вентиляция и обеспыливание воздуха в рудниках. - Л.: Изд-во ЛПИ, 1987. - № 10. - С. 34-41.
54. Качан В.Н., Саранчук Е.В. Влияние давления диспергируемой жидкости на эффективность орошения //Там же. - С. 82-87.
55. Качан В.Н., Саранчук Е.В. Оптимизация параметров орошения на ЭВМ //Обеспыливание воздуха в строительстве. Ростов-на-Дону, Изд-во РИСИ. - 1987. С. 61-70.
56. Качан В.М., Саранчук В.И., Рекун В.В. Критерій ефективності гідрообеспылювання і вибухозахисту у вугільних шахтах //Вісник Академії наук Української РСР. 1987. - № 3. - С. 60-67.
57. Качан В.Н., Саранчук Е.В. Оптимальные параметры гидрообеспыливания воздуха при разработке угля //Пути переработки углей Украины. - Киев : Наук. думка. - 1988. - С. 81-94.
58. Качан В.Н. Сухая уборка пыли в горных выработках //Горный журнал. Известия ВУЗов. - 1989. - № 3. - С. 63-67.
59. Качан В.Н., Забавский А.Н. Экономия теплоты при вентиляции взрывоопасных помещений //Водоснабжение и санитарная техника. - 1988. - № 3. - С. 17-20.
60. Качан В.Н., Соколова Г.Н. Методика выбора типа и количества форсунок при гидрообеспыливании воздуха //Вентиляция шахт и рудников. Комфортность и безопасность атмосферы. - Л.: Изд-во ЛПИ, 1988. - №. - С. 40-45.
61. № 1623725 (СССР). Малогабаритный фильтр. /Забавский А.Н. Качан В.Н., Семёнов Ю.В. - Опубл. в БИ, 1991, № 4.
62. Качан В.Н. Вероятностный метод моделирования процессов в пылегазоочистных аппаратах /Сб. трудов "Обеспыливание воздуха и технологическое оборудование в промышленности". - Ростов-на-Дону. - Изд-во РИСИ. - 1991. - С. 98-107.
63. Качан В.Н., Рекун В.В., Забавский А.Н. Методика расчёта эффективности и режима работы фальтсро-вентіляційних апаратів типа ФВА /Сб. трудов "Обеспыливание воздуха и технологическое оборудование в промышленности". - Ростов-на-Дону. - Изд-во РИСИ. - 1989.
64. Качан В.Н., Доценко А.Н., Мишин В.Ф. Выбор с помощью ЭВМ фильтровальных материалов для очистки газов /Сталь. - 1991. - № 5. - С. 83-86.
65. Высоцкий С.П., Качан В.Н., Шулюк В.А., Изучение процесса десульфуризации дымовых газов сульфатом натрия //Энергетика и электрификация. - № 3, 1994. - С. 47-50.

АНОТАЦІЯ

Качан В.М. Оптимізація параметрів обезпилювання повітря і вибухозахисту на вугільних шахтах.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук по спеціальностям 05.26.04 - Технічні засоби захисту навколишнього середовища, та 05.26.01 - Охорона праці. Донбаська державна академія будівництва та архітектури, Макіївка, 1996.

Вирішена важлива науково-технічна проблема - обезпилювання промислових викидів та запобігання вибухів пилу в шахтах. Розроблені на імовірному рівні математичні моделі роботи зрошувальних систем, циклонів, рукавних і волокнистих фільтрів. Програми вибору пилоуловлювачів з оптимальними параметрами їх роботи впроваджені у проектуванні.

Замість малоефективного осланцювання розроблен комплекс засобів по запобіганню вибухів вугільного пилу, заснованих на використанні води. Запропоновані нові способи безперервного зв'язування вугільного пилу туманоутворюючими завісами, серед них і з'розпилюванням гігроскопічних розчинів.

Комплекс вибухозахисту впроваджен більш, як на 250 шахтах Росії, України, Казахстану, Грузії. Економічний ефект дорівнюється 5 млн. рублів за рік (в цінах 1989 р.).

ABSTRACT

Kachan V.N. Optimization of air disdusting parameters and of dust explosion prevention in coal mines.

The thesis for Doctor's of Technical Sciences Degree; specialities 05.25.04 - Technical means of defence environment protection and 05.26.01 - Labour protection. Donbass State Academy of Building and Architecture, Makeyevka, 1996.

The very important scientific technical problem of industrial discharges disdusting and dust explosion prevention in mines has been solved.

Mathematical models of irrigation systems cyclones, sleeve and fibre filters work have been developed on the probability principles. Programmes for the choice of dust separafors with optimal parameters have been infroduced designing.

They are based on water usage. New ways of continuous dust binding by means of water curtains including spraying hygroscopic compounds have been offend.

The explosion protection complex has been introduced on 250 mines of Russia, Ukraine, Kazakhstan, Georgia. The economic effect amounts to 5 mln roubles a year (at prices of 1983).

Ключові слова: гідрообезпилювання повітря, математична модель, програма на ЕОМ, адекватність, оптимальні показники, циклон, рукавні фільтри, інерційні апарати, зрошувачі, запобігання вибухів, туманоутворюючі завіси, гігроскопічні речовини, глибокі шахти, активуюча добавка, промислове впровадження, економічний ефект.

АВ 34.941

Ответственный за выпуск д.т.н., проф. Губарь В.Ф.

МЧП "ЛИК", г. Донецк. Заказ № 42/96

Объем 1,9 печ. лист. Тираж 110 экз.

16.03.96 г.