

На правах рукописи



Ворошилов Ярослав Сергеевич

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЫЛЕВОЙ
ОБСТАНОВКИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ
ШАХТ С УЧЕТОМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА**

*Специальность 05.26.01 –
«Охрана труда (горная промышленность)»*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Кемерово – 2020

Работа выполнена в ООО «Кузбасский региональный горный центр охраны труда» (ООО «Горный ЦОТ»)

Научный консультант: **Фомин Анатолий Иосифович**, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»)

Официальные оппоненты: **Кравчук Игорь Леонидович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор Челябинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук

Бабенко Александр Григорьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации и компьютерных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Уральский государственный горный университет»

Сердюк Виталий Степанович, доктор технических наук, профессор, директор Института безопасности жизнедеятельности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Защита состоится 30 октября 2020 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 520.063.03 при АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» по адресу: 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «НЦ ВостНИИ»: <http://nc-vostnii.ru/napravleniya-deyatelnosti/nauchno-obrazovatel'naya-deyatelnost/soiskateli.php>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 520.063.03  Д.В. Ботвенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Российская Федерация занимает 6 место среди лидеров по добыче угля. Фонд действующих угледобывающих предприятий России по состоянию на 01.01.2019 составлял 176 предприятий (57 шахт, 119 разрезов), расположенных в 22 угольных бассейнах на 129 месторождениях.

На предприятиях угольной отрасли работает более 144 тысяч человек, среднесписочная численность работников при добыче угля составляет более 90 тысяч человек.

В соответствии с «Программой развития угольной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» ежегодно растет производительность труда, объемы добычи угля. В 2018 году объем добычи угля составил 439,3 млн тонн.

Из угледобывающих регионов страны самым крупным является Кузбасс, на долю которого приходится более половины (58 %) всего добываемого в стране угля и 75 % углей коксующихся марок.

В 2018 году в Кузбассе добычу угля осуществляли 42 шахты и 51 разрез.

Анализируя состояние аварийности, травматизма, профессиональной заболеваемости работников угольных шахт, отметим общую тенденцию к их снижению, но, в то же время, эта тенденция нарушается крупными авариями с участием взрывов метана и угольной пыли. Продолжает оставаться высоким уровень профессиональных заболеваний, вызванных воздействием угольной пыли на организм шахтеров. В Кузбассе уровень профессиональных заболеваний в среднем в 7-8 раз выше, чем в других регионах России, за счет высокой заболеваемости на угольных предприятиях.

Предотвращение крупных аварий и катастроф с человеческими жертвами, и минимизация последствий аварий, произошедших на угольных предприятиях, является актуальной и важной задачей в области охраны труда и промышленной безопасности. Особенно данная задача важна при добыче угля подземным способом как наиболее опасным с точки зрения охраны труда шахтеров.

Как известно, в процессе добычи угля в результате интенсивного техногенного разрушения массива горных пород образуется мелкодисперсная витающая угольная пыль, которая является наиболее распространенным неблагоприятным производственным фактором, оказывающим негативное воздействие на здоровье и безопасность работников.

Кроме того, при взрывах на угольных шахтах рудничного газа, в 20 % случаев принимает участие угольная пыль. Анализ крупных аварий на зарубежных и российских шахтах, в том числе на шахтах Кузбасса: «Распадская», «Зиминка», «Первомайская», «Зыряновская», «Тайжина», «Ульяновская», «Юбилейная», показывает, что участие угольной пыли во взрывах приводит к катастрофическим последствиям, при этом экономический ущерб значительно превышает ущерб от взрывов газа без участия угольной пыли.

Проблемам борьбы с угольной пылью посвящены исследования многих отечественных и зарубежных ученых, в которых изучено влияние угольной пыли на здоровье работников. Рассмотрены основные механизмы пылеобразования, формирования пылеотложения, условия и механизмы воспламенения угольной пыли, разработаны эффективные способы и средства борьбы с пылью, которые позволили снизить аварийность и профессиональную заболеваемость. Среди исследователей следует отметить: Артемьева В.Б., Бабенко А.Г., Голинько В.И., Джигрина А.В., Зыкова В.С., Иванова В.В., Ищука И.Г., Каледину Н.О., Колмакова В.А., Кудинова Ю.В., Ли А.А., Лудзиша В.С., Макарова А.М., Нецепляева М.Н., Павлову Л.Д., Позднякова Г.А., Попова В.Б., Сердюка В.С., Семенихина В.А., Соболева В.В., Тарасова Б.Г., Трубицына А.А., Трубицыну Н.В., Файнбурга Г.З., Фомина А.И., Фрянова В.Н., Чеботарева А.Г., Черданцева С.В., Шевченко Л.А., Cioca I.L., Markowshi A.S. и др.

Вместе с тем проделанная работа и достигнутые результаты не гарантируют полное исключение аварийных случаев на производстве, а также заболеваний, вызванных пылевой этиологией.

Изменение пылевой обстановки на действующих шахтах прежде всего обусловлено резкой интенсификацией работ, введением в строй нового современного высокопроизводительного оборудования, развитием технологий горношахтного производства, позволившего поднять за последние 15 лет среднесуточную нагрузку на забой в четыре раза.

В результате чего традиционные способы контроля пылевой обстановки перестали отвечать требованиям производства. Таким образом, можно констатировать, что сложилась проблема оперативного контроля пылевой обстановки горных выработок в угольных шахтах и, как следствие, невозможности своевременного принятия необходимых мер по снижению рисков аварийности и профессиональной заболеваемости.

Очевидно, что для решения данной проблемы необходим комплексный подход, который включает в себя: теоретические и экспериментальные исследования процессов пылеобразования при разрушении угля; разработку набора методик обеспечивающий всесторонний оперативный контроль пылевого фактора в угольных шахтах; систему управления человеческим фактором для снижения профессиональных заболеваний пылевой этиологии.

В связи с вышеизложенным исследование комплексного контроля пылевой обстановки горных выработок угольных шахт с учетом человеческого фактора является актуальным и своевременным.

Объект исследования: пылевая обстановка в горных выработках угольных шахт.

Предмет исследования: методы контроля пылевой обстановки в угольных шахтах.

Идея работы заключается в повышении уровня охраны труда и безопасности производственных процессов, минимизации рисков профессиональных заболеваний, вызванных запыленностью воздуха горных выработок и взрывов угольной пыли, за счет изучения процессов

пылеобразования, разработки и внедрения комплекса методик и соответствующих технических устройств для оперативного мониторинга состояния пылевой обстановки в угольных шахтах и своевременного принятия эффективных управленческих решений с учетом человеческого фактора.

Целью работы является решение проблемы комплексного контроля пылевой обстановки за счет разработки и внедрения методик и средств контроля состояния пылевой обстановки угольных шахт, на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований процессов пылеобразования для своевременного принятия технически и экономически обоснованных решений по обеспечению охраны труда шахтеров с учетом влияния человеческого фактора.

Задачи исследования:

Исходя из анализа состояния вопроса, актуальности и поставленной цели, при выполнении научной работы необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить комплекс теоретических, на основе подходов мезомеханики, и экспериментальных исследований для создания математической модели разрушения угля с учетом внутренней структуры для изучения процессов пылеобразования без трудоемких научных экспериментов.

2. Разработать методику, позволяющую проводить измерения содержания сланцевой пыли непосредственно в точке отбора пробы для оперативного контроля качества осланцевания горных выработок угольных шахтах в целях обеспечения пылевзрывозащиты.

3. Разработать методику измерения для оперативного контроля витающей угольной пыли в воздухе рабочей зоны для принятия своевременных и эффективных мер по снижению аварийности и профессиональной заболеваемости пылевой этиологии.

4. Разработать методику измерения массовой концентрации витающей угольной пыли в воздухе рабочей зоны в непрерывном режиме для обеспечения принятия оперативных мер по управлению охраной труда.

5. Разработать новую концептуальную модель человеческого фактора, позволяющую снизить уровень аварийности, травматизма и профессиональной заболеваемости на угольных шахтах.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Теоретические и экспериментальные исследования разрушения угля на мезоскопическом масштабном уровне с учетом фрактальных особенностей его структуры позволяют производить изучение процессов пылеобразования, которые невозможно реализовать на современном лабораторном и испытательном оборудовании.

2. Методика, основанная на прямом определении объема выделившегося газа при воздействии раствора лимонной кислоты на смесь сланцевой и угольной пыли для измерения количества сланцевой пыли в пробе, позволяет обеспечить контроль пылевзрывозащиты за счет оперативной оценки качества осланцевания горных выработок при помощи соответствующих технических устройств.

3. Разработанная методика контроля угольной пыли в воздухе рабочей зоны, основанная на депреометрическом методе измерения, позволяет создавать переносные экспресс-анализаторы оперативного контроля массовой концентрации витающей угольной пыли в любой точке горных выработок для принятия оперативных и эффективных мер по снижению аварийности и профессиональных заболеваний пылевой этиологии.

4. Создание методики измерения витающей угольной пыли, основанной на рассеянии инфракрасного излучения в пылевом облаке с новым принципом защиты оптических элементов, позволяет разрабатывать технические устройства, обеспечивающие необходимой информацией систему управления охраной труда, для принятия оперативных и эффективных мер по снижению аварийности и профессиональных заболеваний пылевой этиологии.

5. Концептуальная модель, основанная на новом определении человеческого фактора как изменяющейся во времени и пространстве разности между фактическим уровнем способностей и требуемым уровнем способностей человека, позволяет снизить уровень травматизма и профессиональной заболеваемости на предприятиях горной промышленности за счет массового внедрения систем управления человеческим фактором, обеспечивающих целенаправленное развитие и поддержание требуемых способностей работника.

Научная новизна результатов работы:

1. Создана математическая модель упруго-вязкопластической деформации и разрушения угля на мезоскопическом масштабном уровне.

2. Выявлена фрактальная структура минеральных включений и систем пор на различных масштабных уровнях. Установлена корреляционная связь между фрактальной размерностью внутренних структур угля и фрактальной размерностью поверхности частиц разрушенного угля. Установлено, что фрактальная размерность внутренних структур угля находится в пределах $D = 2,35-2,45$.

3. Разработана оригинальная методика контроля пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт, основанная на прямом измерении объема выделившегося диоксида углерода из отобранной пробы.

4. Для обеспечения контроля содержания витающей угольной пыли в воздухе предприятий создана методика, основанная на автоматическом определении аэродинамического сопротивления фильтрующего элемента с последующим расчетом массовой концентрации угольной пыли.

5. Для непрерывного автоматического контроля витающей угольной пыли в воздухе шахт разработана новая методика измерения, основанная на рассеянии инфракрасного излучения.

6. Построена концептуальная модель человеческого фактора, которая позволяет практически все исследования в области охраны труда связать с человеческим фактором.

Методы исследования.

В основу работы положены следующие методы и теории: физической мезомеханики деформации твердых тел; механики твердых тел; вероятности и

математической статистики; численные; физической оптики; электрических схем; обработки экспериментальных данных; химического взаимодействия.

Требуемые экспериментальные данные получены на натуральных установках и в условиях угольных шахт.

Достоверность и обоснованность научных результатов исследований подтверждается большим объемом статистических данных, собранных на предприятиях угольной промышленности, использованием проверенных методик обработки экспериментальных данных. Проведено более 100 численных моделирований разрушений угля под различными видами нагружения. Исследовано более 15 образцов угля с использованием топографических методов.

Достоверность результатов контроля пылевой обстановки, полученных с использованием предложенных методик, подтверждается внесением в государственный реестр средств измерений соответствующих технических устройств.

Практическая значимость заключается в решении проблемы комплексного контроля пылевой обстановки.

Результаты исследований позволили:

– разработать методику и техническое устройство для измерения качества осланцевания горных выработок и оснастить этими устройствами угольные шахты России (свыше 2 000);

– разработать методику и техническое устройство для измерения витающей угольной пыли в воздухе горных выработок и оснастить данными устройствами угольные предприятия России (свыше 1 000);

– разработать методику и техническое устройство для автоматического мониторинга пылевой обстановки в угольных шахтах, позволившие расширить возможности системы аэрогазового контроля на угольных шахтах, и оснастить устройствами предприятия топливно-энергетического комплекса России (свыше 3 000);

– разработать методики контроля, позволившие усовершенствовать систему аэрогазового контроля на угольных шахтах;

– разработать электронный взрывозащищенный носитель персональной системы управления человеческим фактором.

Результаты исследований позволят снизить уровень травматизма и профессиональных заболеваний, повысить эффективность производства и получить заметный экономический эффект.

Реализация результатов работы.

Результаты научных исследований реализованы в виде технических средств измерений в ООО «Горный-ЦОТ». Данное оборудование поставляется на все угольные шахты России.

Апробация результатов работы.

Результаты исследования и основные положения диссертационной работы обсуждались и были одобрены научной общественностью на Всероссийских и Международных научно-практических конференциях: XVII Международной

научно-практической конференции КузГТУ «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2018» в Кемерово 22 – 23 ноября 2018 г., XII Международной научной конференции КузГТУ «Инновации в технологиях и образовании» в Белово 22 – 23 марта 2019 г., VIII научно-практической конференции КузГТУ «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» в Междуреченске 03 – 04 апреля 2019 г., XI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая» КузГТУ в Кемерово 16 – 19 апреля 2019 г.

Созданные автором на основе разработанных методик устройства представлялись на Международных выставках-ярмарках «Уголь-Майнинг России» и были отмечены дипломами и медалями.

Прибор ПКА-01 отмечен как инновационный прибор премией губернатора Кемеровской области в 2011 году.

Исследования проводились в рамках реализации целевой программы «Система обеспечения охраны труда, промышленной и экологической безопасности предупреждения крупных аварий и катастроф на предприятиях горной отрасли», рассмотренной и согласованной на заседании Ученого совета Акционерного общества «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» и утвержденной генеральным директором АО «НЦ ВостНИИ» Ю.М. Филатовым 13.09.2018 года.

Личный вклад автора заключается:

- в проведении анализа состояния условий и охраны труда работников подземной группы угольных шахт, обеспечении безопасности ведения горных работ по пылевому фактору;

- в разработке элементов математической модели пылеобразования с учетом упруго-вязкопластической деформации и разрушения угля на мезоскопическом масштабном уровне, и установлении фрактальной структуры внутреннего пространства каменных углей;

- в изучении возможностей измерительной аппаратуры, приборной базы контроля состояния запыленности и осланцевания горных выработок угольных шахт;

- в разработке методики и оборудования для оперативного контроля качества осланцевания горных выработок угольных шахт;

- в разработке методики и оборудования контроля состояния атмосферы горных выработок для определения концентрации витающей пыли в воздухе горных выработок и на рабочих местах шахтеров;

- в разработке методики и технического устройства непрерывного контроля состояния пылевой обстановки в воздухе рабочей зоны;

- в создании комплекса приборов для оперативного и автоматического мониторинга пылевой обстановки на предприятиях угольной промышленности, ведущих добычу угля подземным способом;

- в разработке новой концептуальной модели человеческого фактора и создании на ее базе системы управления человеческим фактором.

Разработанные автором предложения обладают значительным социальным эффектом и позволят снизить травматизм и профессиональную заболеваемость на угольных шахтах России.

Публикации.

Результаты диссертации представлены в 44 печатных работах, в их числе в изданиях, входящих в Перечень российских рецензируемых журналов ВАК, – 24, в прочих изданиях – 4, 15 патентов на изобретения и полезные модели.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, изложенных на 308 страницах, содержит 30 рисунков, 15 таблиц, списка литературы из 265 наименований.

В первой главе проведен анализ текущего состояния ситуации, связанной с контролем пылевой обстановки на угольных шахтах России, подчеркнута важность влияния человеческого фактора на общее состояние охраны труда и в частности пылевой обстановки.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям по разрушению угля на мезоскопическом масштабном уровне, исследованиям внутренней структуры угля с применением современного оборудования, получению численных оценок выхода результатов разрушения угля при различных видах нагружения.

Третья глава посвящена разработке методики по оценке уровня пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт, использующих инертную пыль в качестве средства снижения опасности взрывов угольной пыли.

В четвертой главе представлена разработка методики измерения витающей угольной пыли в воздухе рабочей зоны с использованием депреометрического метода.

В пятой главе представлена методика непрерывного автоматического измерения концентрации угольной пыли в воздухе подземных выработок угольных шахт.

В шестой главе описаны создание концептуальной модели управления человеческим фактором как изменяющейся во времени и пространстве разности между фактическим уровнем способностей и требуемым уровнем способностей человека. А также приведен пример электронного взрывозащищенного носителя персональной системы управления человеческим фактором.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Основные результаты исследования отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Теоретические и экспериментальные исследования разрушения угля на мезоскопическом масштабном уровне с учетом фрактальных особенностей его структуры позволяют производить исследования процессов пылеобразования, которые невозможно реализовать на современном лабораторном и испытательном оборудовании.

Как уже упоминалось выше, в связи с большими сложностями по экспериментальному определению пылевыведения, необходимо продолжать совершенствовать математические модели разрушения угля и пылеобразования, которые позволяют, в частности, давать более точный прогноз дисперсного состава пылевого аэрозоля, что, в конечном итоге, влияет на повышение безопасности ведения работ горных работ в угольной промышленности и сохранение жизни и здоровья работников.

Данные исследования являются развитием работ Института физики прочности и материаловедения СО РАН (ФГБУН ИФПМ СО РАН) и базируются на принципах физической мезомеханики деформируемого твердого тела, в основу которой положена концепция структурных уровней деформации твердых тел. Подходы мезомеханики были применены к изучению разрушения угля, который представлен геосредой в виде блочных элементов разных структурных уровней.

Концепция структурных уровней деформации содержит в себе следующие принципиальные положения:

- твердое тело, подвергающееся деформации, является многоуровневой системой, в которой пластическое течение самосогласованно развивается как эволюция последовательных шагов на уровнях: микро-, мезо-, макро-;

- структурные элементы, являющиеся носителями пластического течения на мезоуровне – зерна, сюзерены, домены, поры, имеют движения, складывающееся по схеме «сдвиг и поворот»;

- завершающей стадией локализации на макромасштабном уровне фрагментации твердого тела является его разрушение.

Для проведения математического моделирования была разработана структурная модель мезообъема угля с использованием подходов мезомеханики. В основу данной модели положены следующие допущения из теории мезомеханики:

- механические свойства угля, такие как прочностные характеристики, должны быть смоделированы с использованием разработанного для модели мезообъема;

- свойства представительного мезообъема для использования в моделировании, в том числе механические, складываются из средних механических характеристик основных компонентов угля;

- важное для моделирования влияние на характеристики моделируемого мезообъема оказывает пористая структура угля, которая формирует области в мезо объеме, несмотря на статистически однородное распределение пор по мезообъему.

Для решения задачи упруго-вязкопластической деформации и разрушения угля на мезоуровне как в квазистатической, так и в динамической постановках применены следующие методы решения задач механики деформируемого твердого тела для моделирования механического поведения структурно-неоднородных материалов и конструкций: вариационно-разностный метод расчета напряженно-деформированного состояния структурно-неоднородных

материалов при квазистатических нагрузках в двумерной постановке; конечно-разностный метод решения этих задач в динамической двумерной постановке. Данные методы и разработанные на их основе алгоритмы и компьютерные программы позволяют решать перечисленные задачи в геометрически и физически нелинейных постановках.

Вариационно-разностная схема решения квазистатической задачи упруго-вязкопластического течения мезообъема неоднородного материала строится на основе вариационного уравнения Лагранжа

$$\begin{aligned} & \iiint_V (\sigma_{ij}^E + \Delta^* \sigma_{ij}) \cdot \delta(\Delta^* e_{ij}) \cdot dV^{(n)} + \iiint_V (\sigma_{ij}^E + \Delta^* \sigma_{ij}) \cdot \delta(\Delta^* \omega_{ij}) \cdot dV^{(n)} - \\ & - \iiint_V (\bar{P}_i + \Delta \bar{P}_i) \cdot \delta(\Delta u^i) \cdot dV^{(n)} - \iint_{S_\sigma} (\bar{R}_i + \Delta \bar{R}_i) \cdot \delta(\Delta u^i) \cdot dS^{(n)} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{P}_i, \Delta \bar{P}_i, \bar{R}_i, \Delta \bar{R}_i$ – заданные объемные и поверхностные силы и их приращения на $(n+1)$ шаге нагружения; $\Delta u^i, \delta(\Delta u^i)$ – приращения компонент вектора перемещений и их вариации; $\Delta \sigma_{ij}^E + \Delta^* \sigma_{ij}$ – модифицированный тензор напряжений Кирхгофа.

$$\text{grad}(T)^{(n+1)} \Big|_{P(x_1, x_2, x_3) \in \Delta V} = T^{(n+1)} \cdot d_{,j} \cdot \vec{i}_j = \frac{\iint T^{(n+1)} d\bar{S}}{\iiint_{\Delta V} dV}, \quad (2)$$

где $\Delta V, \Delta S$ – объем и площадь ячейки конечно-разностной сетки, построенной в расчетной области; $(n+1)$ – номер шага по времени.

В динамической постановке задачи используется конечно-разностный метод решения задач в двумерной постановке.

При решении задачи в динамической постановке поведение материала моделировалось в предположении плоского деформированного состояния. При расчетах использовалась основная система уравнений механики сплошной среды при отсутствии внешних притоков тепла и массовых сил:

– уравнение неразрывности

$$\dot{V} / V - \dot{u}_{i,i} = 0; \quad (3)$$

– уравнение движения

$$\rho \dot{u}_i = \sigma_{ij,j}; \quad (4)$$

– соотношение для тензора скоростей полных деформаций

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (5)$$

Здесь $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}$ – компоненты тензора напряжений; $V = \rho_0 / \rho$ – удельный относительный объем материала; ρ_0, ρ – начальное и текущее значения плотности материала; P – гидростатическое давление; S_{ij} – компоненты тензора девиатора напряжений; δ_{ij} – символ Кронеккера; u_i – компоненты вектора перемещений; точка сверху означает производную по времени, запятая в нижнем индексе – частную производную по соответствующей координате.

Для замыкания системы уравнений принималась модель баротропной среды с условием Мизеса для перехода в пластическое состояние:

$$P = K\left(\frac{1}{V} - 1\right), \quad (6)$$

$$\dot{S}_{ij} = 2\mu\left(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\delta_{ij}\right) \text{ при } S_{ij}S_{ij} < \frac{2}{3}Y^2, \quad (7)$$

$$\dot{S}_{ij} + lS_{ij} = 2\mu\left(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\delta_{ij}\right) \text{ для } S_{ij}S_{ij} = \frac{2}{3}Y^2, \quad (8)$$

где l – скалярный множитель, обеспечивающий приведение напряжений на круг текучести.

$$l = \frac{3\mu}{Y^2} S_{ij}\left(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\delta_{ij}\right) \quad (9)$$

Здесь Y – локальный предел текучести материала.

Для разработки модели мезообъема, применяемого при исследованиях и расчетах, использовался изученный ранее микрокомпонентный состав пласта Польшаевский I.

На рисунке 1 и в таблице 1 представлена разработанная структурная модель мезообъема угля с обозначенными порами. Размер стороны мезообъема $\sim 0,5$ мм.



Рисунок 1 – Структура мезообъема угля с обозначенными порами

В разработанной модели использованы микрокомпоненты с прочностными характеристиками, приведенными в таблице 1. Данные о прочностных и пористых характеристиках угля были получены из справочной литературы.

Таблица 1 – Микрокомпонентный состав образца мезообъема

Цвет	Название микрокомпонента	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Процентное содержание микрокомпонента
	Лейптинит	15	1,5	2,31 %
	Витринит	23	2,3	68,00 %
	Минеральные примеси	80	8	7,7 %
	Воздух			5,77 %
	Фюзенит	135	13,5	14,75 %
	Семивитринит	28	2,8	1,47 %

С использованием модели, упомянутой выше, (1)–(9) для модельного образца угля заданного состава было рассчитано распределение пылевых частиц по размерам в диапазоне 2–100 мкм.

Следует отметить, что расчеты проводились для различных видов нагружения: сдвиг вдоль слоев, сжатие вдоль слоев, сжатие поперек слоев, сдвиг поперек слоев. Максимум относительного выхода разрушенных частиц во всех случаях находился в диапазоне 5–12 мкм. В качестве примера на рисунке 2 представлен характерный график распределения пылевых частиц по размерам.

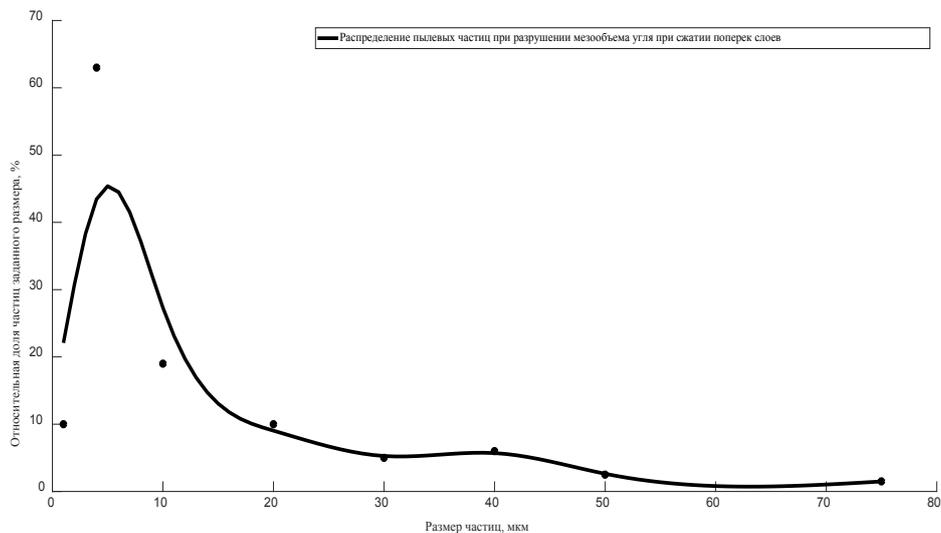


Рисунок 2 – Распределение пылевых частиц при разрушении мезообъема угля при сжатии поперек слоев

Таким образом, моделирование упруго-вязкопластической деформации и разрушения угля на мезоскопическом масштабном уровне при различных видах нагружения показало, что при любых типах нагружения разрушение угля происходит с максимальным выходом фракций 5–12 мкм, которые являются наиболее опасными с точки зрения заболеваний пылевой этиологии работников угольной промышленности.

Исходя из этого, для подтверждения теоретических результатов был проведен комплекс экспериментальных исследований.

В лабораторных условиях для анализа состава угольной пыли применялись три метода анализа: ситовый анализ, анализ на весовом седиментометре ВС-3 и анализ угольного аэрозоля в пылевой камере «УПП-1». Данные седиментационного и ситового анализа представлены на рисунке 3.

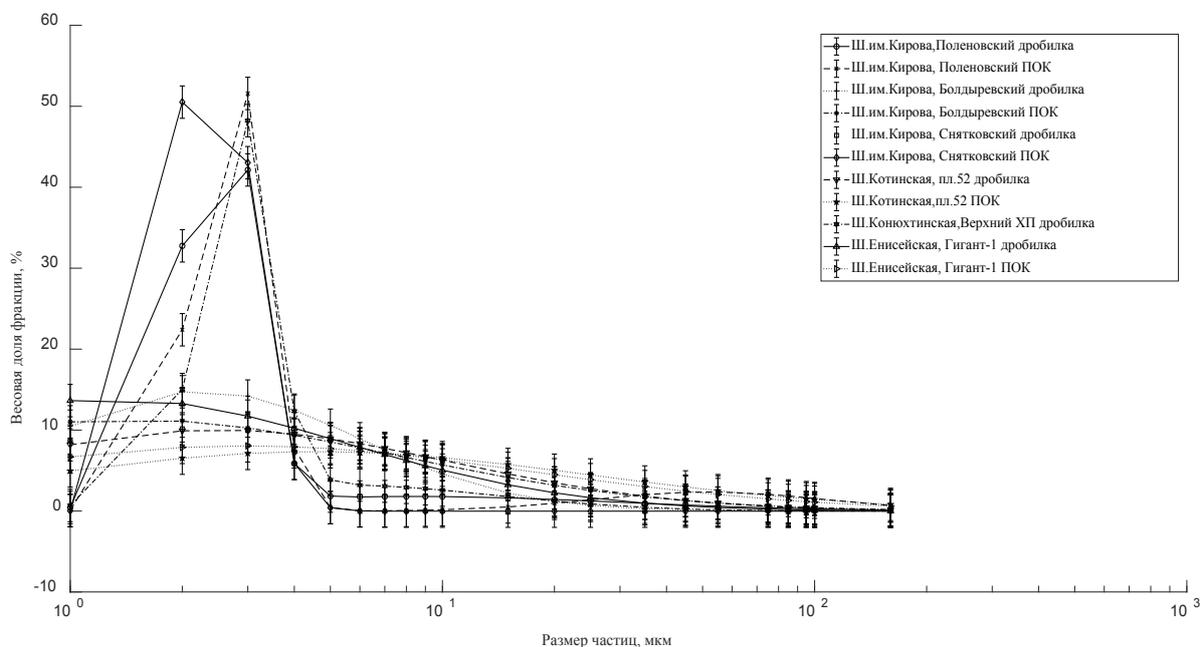


Рисунок 3 – Результаты ситового и седиментационного анализа образцов угля при различных способах разрушения с максимальным размером частиц 1000 мкм

Как следует из графиков, построенных по результатам обработки данных, массовые доли фракций при различных способах разрушения являются величиной практически постоянной и незначительно меняются от пласта к пласту.

В результате проведенных исследований отметим, что наблюдается достаточно хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными результатами, свидетельствующее в пользу того, что подходы мезомеханики удовлетворительно описывают процессы разрушения угля.

Очевидно, следует продолжить дальнейшие работы по развитию описанного подхода с использованием данных об объемной структуре угля. Возможный переход от плоских моделей к объемным сдерживался резким ростом требуемых вычислительных мощностей. Однако в последнее время прогресс в вычислительной технике, в системах распределённых вычислений и облачных суперкомпьютерах позволяет обеспечить требуемые мощности для проведения математического моделирования. Вместе с тем, для корректной трехмерной математической модели требуются новые фактические данные об объемной структуре угля.

Для получения данных об объемном распределении нарушений, пор и вкрапления в уголь был использован современный подход неразрушающего исследования горной массы – рентгеновский томографический метод. Эксперименты проводились на двух томографах: микрофокусном рентгеновском томографе TOLMI–150–10 с пространственным разрешением 20x20x20 мкм и томографе GE LightSpeed VCT с разрешением 390x390x625 мкм. Данный подход позволил исследовать образцы угля на различных масштабных уровнях.

При проведении исследования на томографе для более четкой визуализации микропористой структуры образцы углей пропитывались насыщенным водным раствором рентгеноконтрастного вещества.

На рисунке 4 приведена объемная реконструкция образца угля марки Г, исследуемого на томографе TOLMI; с целью получения качественного изображения в реконструкции использовались достаточно плотные «облака» – выше 60 % от максимальной интенсивности поглощения. На рисунке видно, что «облака» системы пор вытянуты по напластованию и имеют достаточно сложную структуру.

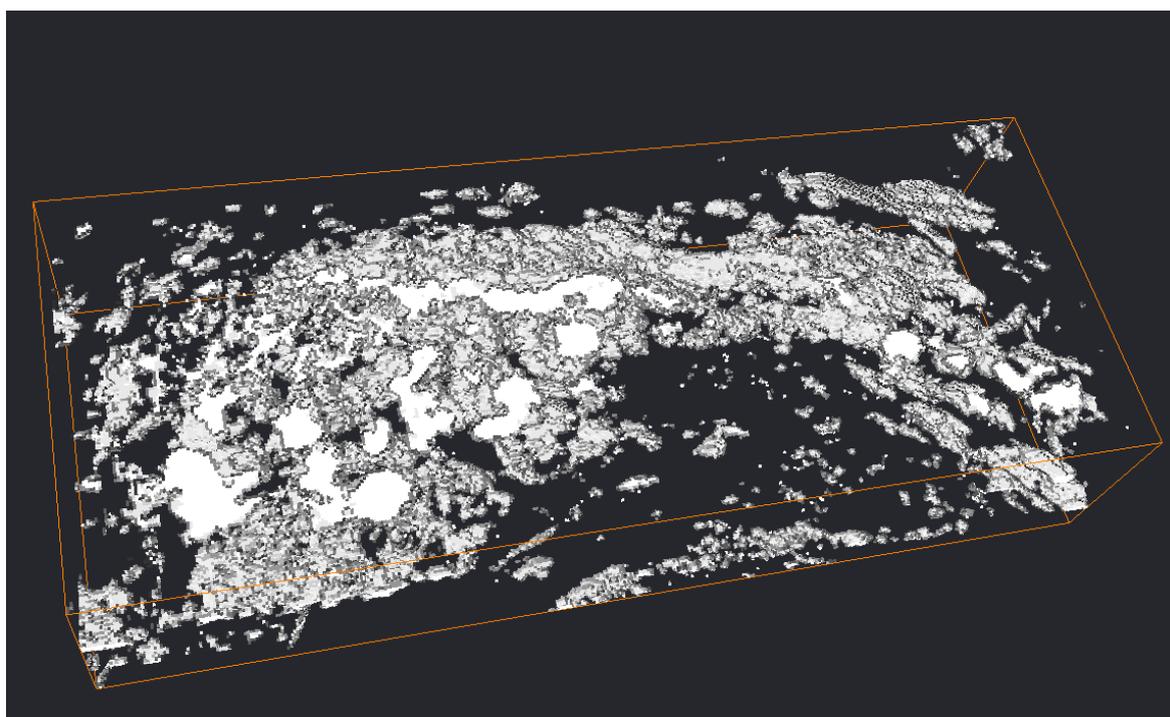


Рисунок 4 – 3D-визуализация «облака» пор, полученного на томографе TOLMI, размеры обозначенного «вырезанного» блока 6 x 3 x 2 мм

Для проведения томографирования образцов на томографе GE Lightspeed VCT была создана сборка из 7 образцов с нескольких шахт Кузбасса (рисунок 5).

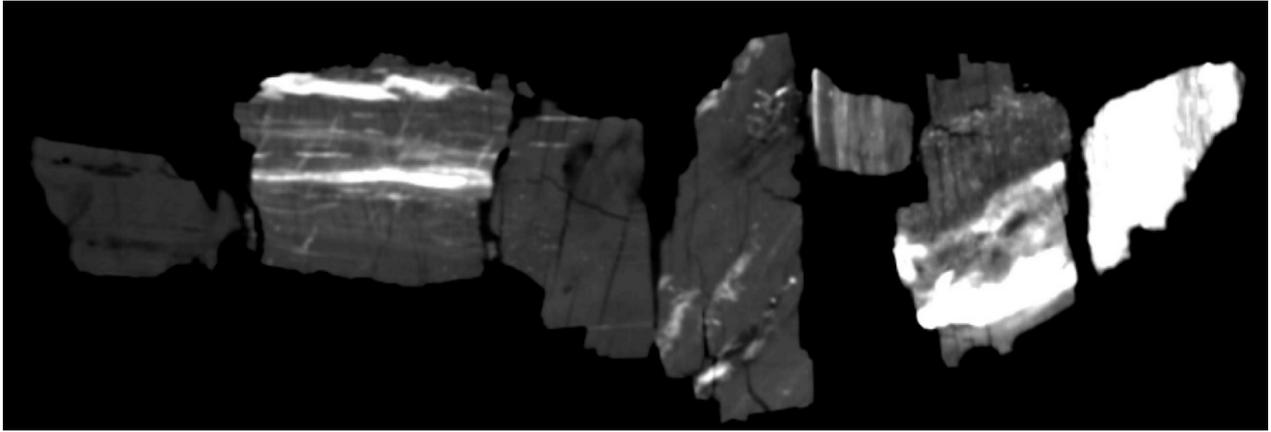


Рисунок 5 – Визуализация карты плотностей, в плоскости YZ, образцов угля, полученной на томографе GE Lightspeed VCT

На рисунке 5 для наглядности приведен один «срез» блока из 7 различных образцов углей, на основании которых получают данные для восстановления трехмерной структуры плотностей угля. Далее с помощью специализированного программного обеспечения происходит выделение интересующих пространственных блоков с одновременной селекцией внутренних структур по плотности, как это показано на рисунке 6.

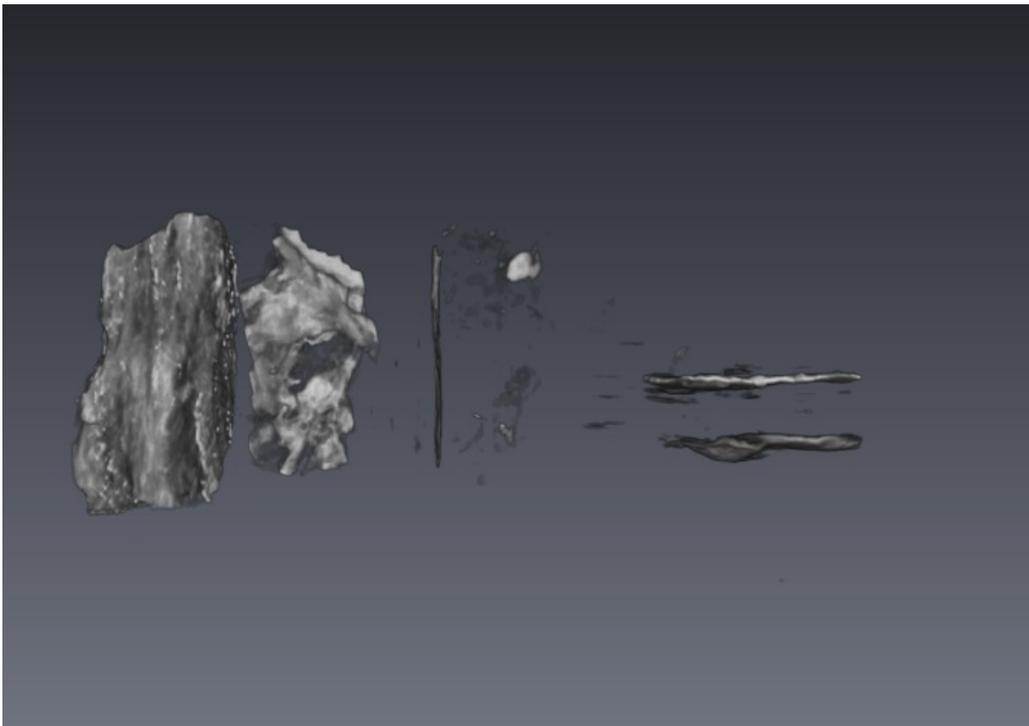


Рисунок 6 – Трехмерная реконструкция промежутка плотностей от $1,44 \text{ г/см}^3$ до $2,28 \text{ г/см}^3$

Для описания таких сложных гетерогенных структур, в том числе получаемых с использованием томографов, в последнее время успешно используются методы фрактальной геометрии.

Одним из основных параметров, отражающих суть фрактального объекта, является фрактальная размерность исследуемого объекта либо его составных частей.

В данной работе под фрактальной размерностью принимаем общеупотребительное выражение отношения логарифмов площади и периметра изучаемого объекта либо для трехмерных объектов соотношение логарифмов объема и поверхности.

На рисунке 7 приведен график отношения логарифмов площади и периметра облаков пор различной плотности, полученных в результате обработки срезов из томограммы, представленной на рисунке 4. Установлено, что фрактальная размерность плоских срезов пористой системы равна $D = 2,37$.

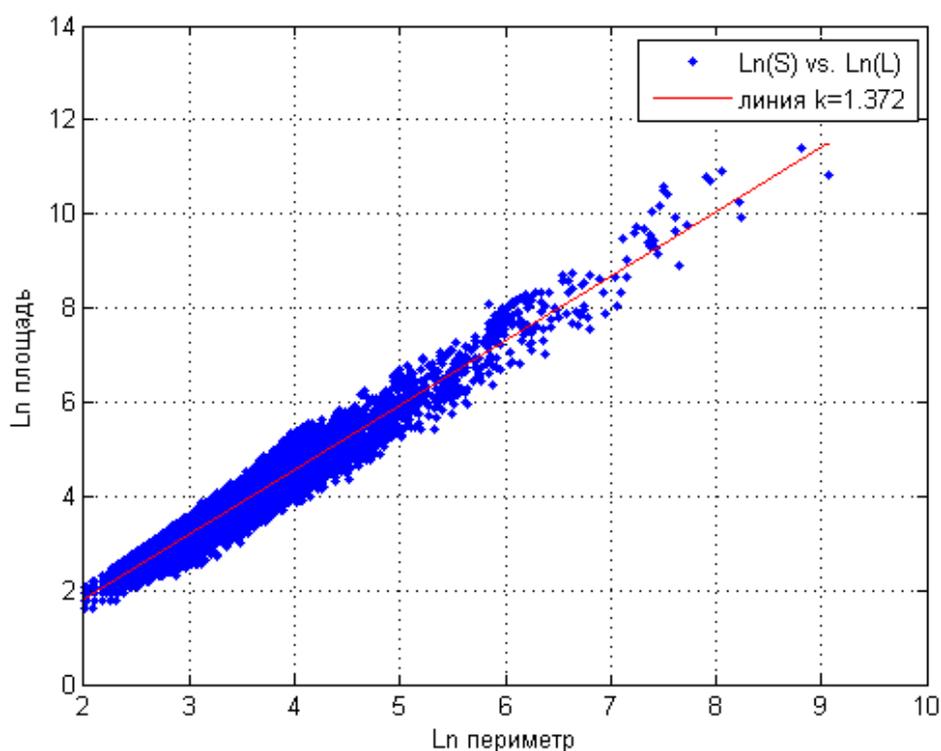


Рисунок 7 – Логарифмическая зависимость площади и периметра «облаков» пор для томограммы (томограф TOLMI), изображенной на рисунке 4

Аналогичные расчеты были проведены для углей, исследуемых на томографе GE Lightspeed VCT.

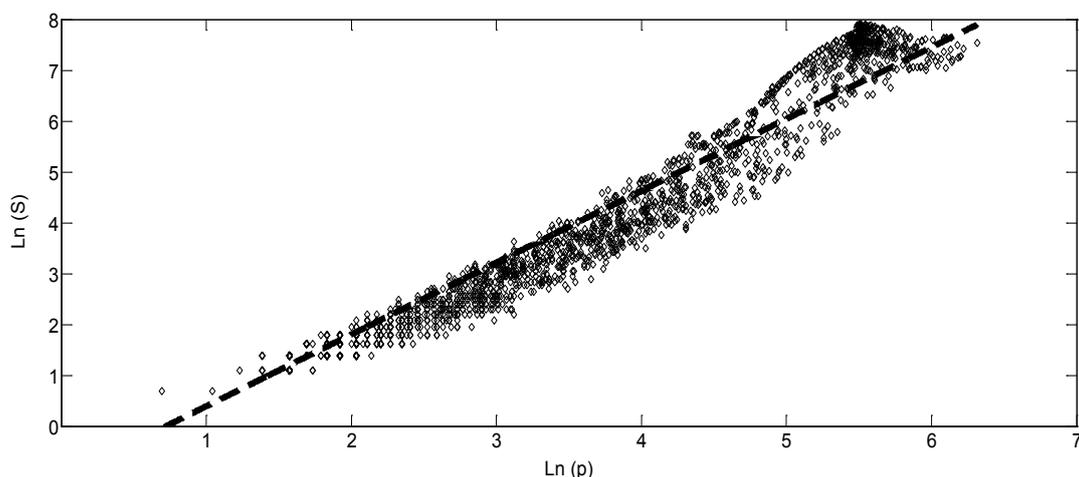


Рисунок 8 – Логарифмическая зависимость площади и периметра «облаков» пор для томограммы (томограф GE Lightspeed VCT), изображенной на рисунках 5-6

Рассчитанная фрактальная размерность для образцов угля, исследованных в томографе GE Lightspeed VCT, составила $D = 2,43 \pm 0,15$.

Далее образцы разрушались с использованием прибора ПОК и молотка для установления связи между внутренней структурой и продуктами разрушения.

После разрушения все частицы с размерами менее 5 мм по одной оси были помещены в оптический сканнер с максимальным разрешением 4800 x 9600 dpi, что соответствует размеру минимального сканируемого элемента 5,29 x 2,64 мкм, для проведения количественного и размерного анализа и для расчета фрактальной размерности. На рисунке 10 переставлены фотографии пыли после разрушения образца и бинаризации изображения.

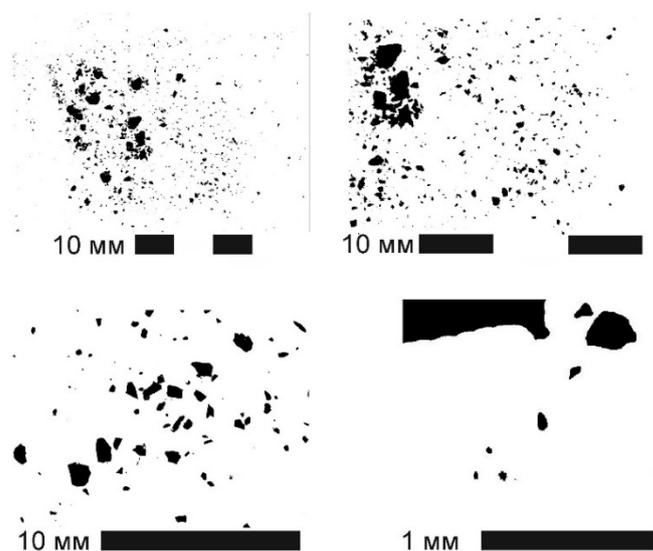


Рисунок 9 – Изображение частиц, полученных после разрушения образца ш. «Полысаевская», пл. «Голмачевский» (48)

После проведения необходимых манипуляций по получению оптического изображения, его бинаризации, поиску частиц угля, подсчету количества частиц, геометрических размеров, площади. После получения полных данных о каждой частице, как и ранее, строилась линейная аппроксимация отношения логарифмов периметра и площади. Тангенс угла наклона прямой аппроксимирующей данное отношение и является искомой фрактальной размерностью.

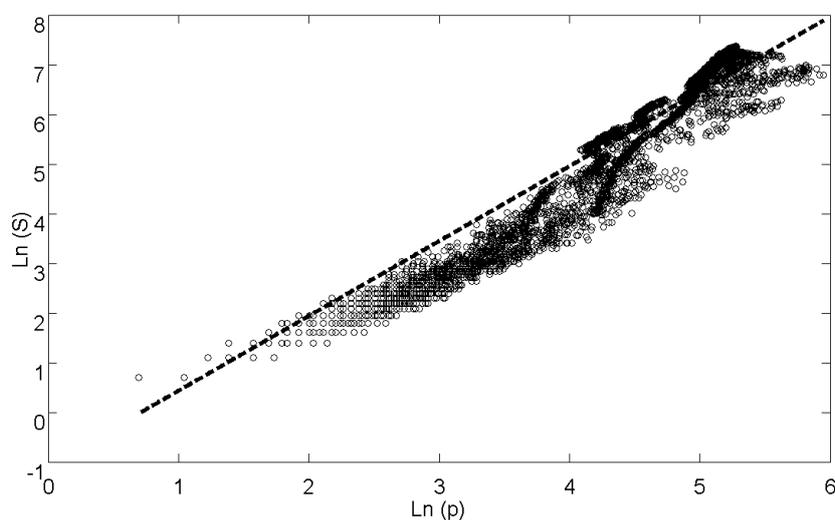


Рисунок 10 – Фрактальная размерности для разрушенного образца ш. «Полысаевская», пл. Толмачевского (48). $D = 2,695$

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований установлено, что вне зависимости от масштабного уровня измерения объемной фрактальной размерности, получаемые значения близки. Кроме того, близки фрактальные размерности объемных внутренних структур угля и полученных продуктов разрушения угля, что говорит о несомненной связи процесса разрушения угля с его внутренней структурой.

Данные результаты следует рассматривать как первые шаги использования трехмерной томографии для изучения связей между фрактальными структурами и процессами разрушения.

2. Методика, основанная на прямом определении объема выделившегося газа при воздействии раствора лимонной кислоты на смесь сланцевой и угольной пыли для измерения количества сланцевой пыли в пробе, позволяет обеспечить контроль пылевзрывозащиты за счет оперативной оценки качества осланцевания горных выработок при помощи соответствующих технических устройств.

Пыль при разрушении угольного пласта, кроме неблагоприятного воздействия на здоровье человека, оказывает существенное влияние на безопасность ведения горных работ.

Мельчайшие частицы угольной пыли способны находиться длительное время в воздухе во взвешенном состоянии или оседать на кровле, стенках горных выработок и на почве, воспламеняться или взрываться.

Проблема комплексного подхода к решению задач пылевзрывобезопасности наталкивается на техническое несовершенство приборной базы, необходимой для оценки пылевзрывобезопасности угольных шахт с использованием инертной пыли. Еще раз подчеркнем, что использование инертной пыли является одним из наиболее эффективных средств обеспечения пылевзрывобезопасности в угольных шахтах. Контролируемые нормы осланцевания устанавливаются соответствующими нормативными документами.

В мировой практике для контроля пылевзрывобезопасности или качества осланцовки используются методы, основанные на различных физических и химических принципах. Например, радиоизотопные и оптические методы, а также химический метод, связанный с реакцией хлористоводородной кислоты с содержащимися в отобранной пробе карбонатами. Кратко рассмотрим эти методы.

При использовании радиоизотопного метода датчик, расположенный в корпусе прибора, регистрирует поток отраженного бета-излучения от отобранной пробы, что позволяет определить количество негорючих веществ, находящихся в смеси. Данный метод является оперативным, и для его реализации разработаны переносные приборы с возможностью эксплуатации в угольных шахтах. В то же время существенное влияние на точность измерения накладывает влажность отобранной пробы. Также использование радиоизотопного источника накладывает дополнительные технические и административные ограничения по контролю, учету и калибровке прибора, связанные с оборотом радиоактивных веществ. Следует принимать во внимание и психологические аспекты работы персонала шахты с источниками радиоактивного излучения персоналом шахты.

Методики и основанные на этих методиках приборы, использующие оптическое излучение для измерения количества инертной пыли в отобранной пробе, можно условно разделить на два типа: измерение отраженного света от отобранной пробы и измерение оптической плотности фильтра с осажденной на нем пробой пыли. К недостаткам данных методик можно отнести то, что угольная пыль даже одной и той же марки угля имеет различный микродисперсный состав, и микрочастицы угля в различной степени слипаются с частицами сланцевой пыли. Эти явления сильно искажают любые оптические измерения, поэтому конструирование приборов на данных оптических принципах является проблематичным.

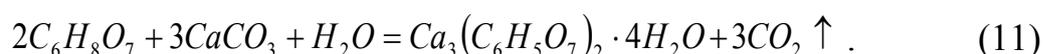
Химический метод определения количества сланцевой пыли в отобранной пробе, которая состоит в основном из карбоната кальция и угольной пыли, заключается в воздействии раствора соляной кислоты на пробу, и далее измерении количества выхода различных продуктов реакции, характеризующих количество карбоната кальция: изменение кислотности среды, выход

углекислого газа и т. п. Основным достоинством является высокая точность измерения содержания инертной пыли в пробе. Однако трудоемкость, время, затрачиваемое на подготовку и проведение измерения, требования к оснащению специализированной лаборатории, расположенной на поверхности, нормативные сроки доставки пробы, определяют низкую оперативность данного метода для принятия своевременных управленческих решений.

Учитывая вышесказанное, в основу разрабатываемой методики, а затем и технического средства, было решено положить химический метод определения карбонатов, как дающий наиболее точные результаты и неподверженный влиянию марок угля и дисперсного состава измеряемой пыли. Идея метода состояла в химическом разложении карбоната кальция и фиксации количества продуктов разложения, в нашем случае – углекислого газа, непосредственно на месте отбора пробы – шахте.

В ходе разработки методики для определения весового количества добавки инертной пыли особое внимание было обращено на ее безопасность для персонала. Так, например, в отличие от первоначальной реакции в методике, в которой применяется соляная кислота, имеющая класс опасности 2 (вещества высокоопасные в соответствии с п. 4.4 ГОСТ 857-95), что допустимо при лабораторном методе исследований, в составе реактива была сделана замена на кислоту лимонную, для которой класс опасности снижен до 3 (вещества умеренно опасные), что позволило упростить требования к эксплуатации, хранению и утилизации продуктов химической реакции.

Добавление этилового спирта в исходный реактив позволяет разрушить пленку гидрофобизирующей добавки на поверхности частиц инертной пыли. В общем виде, реакции, происходящие в колбе, описываются следующими формулами:



Измеряя выход продуктов реакции, а именно выход углекислого газа, можно произвести вычисления и однозначно определить количество карбоната кальция, изначально присутствующего в отобранной пробе.

Для подтверждения данной методики была разработана экспериментальная установка. Кратко опишем данную установку по блок-схеме, приведенной на рисунке 11.

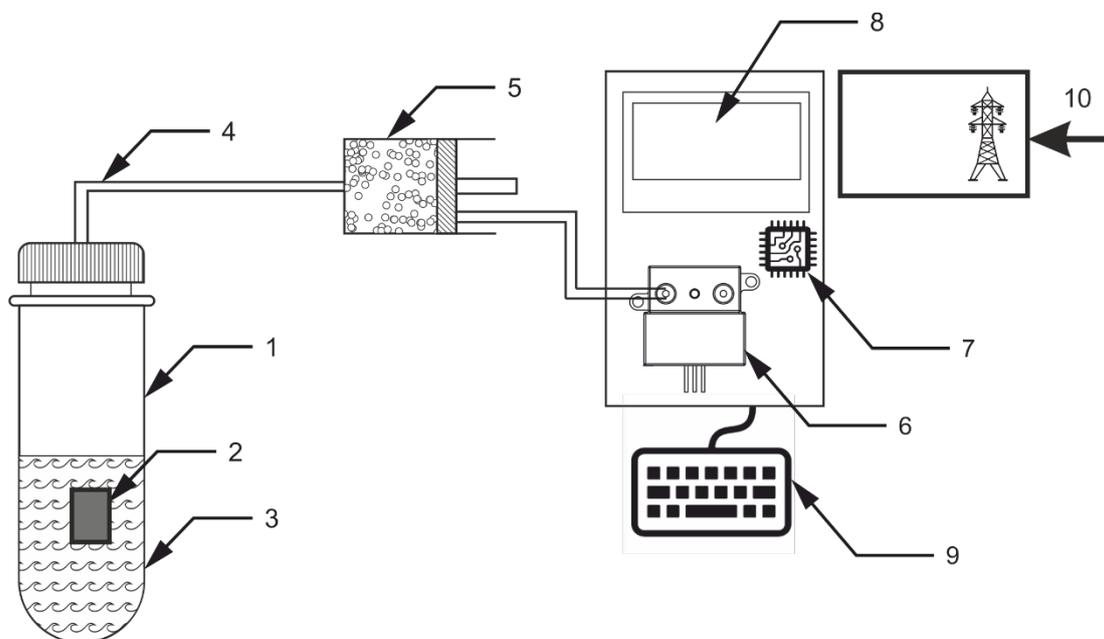


Рисунок 11 – Экспериментальная установка

Установка состоит из колбы (1), в которой происходит химическая реакция между навеской пыли, размещенной в пробоотборнике (2), и реактивом (3), заранее помещенным в колбу. Колба закрывается герметичной крышкой с установленной газоотводящей трубкой (4). Газообразные продукты реакции поступают по трубке в патрон влагопоглотителя (5) для проведения осушения. После проведения осушения газ поступает на датчик измерения скорости расхода газа (6), подключенный к микроконтроллеру (7) либо напрямую к компьютеру для считывания и обработки результатов. В случае использования экспериментальной установки без компьютера к микроконтроллеру подключаются дисплей (8), клавиатура (9) и источник питания (10).

Приведем краткое описание методики для экспериментальной установки, использующейся для определения количественной добавки инертной пыли, соответствующей ГОСТ Р 51569-2000.

Первоначально подготавливается представительный объем вещества для исследования по методике. В случае проведения эксперимента в лабораторных условиях производят смешивания известных объемов угольной пыли и инертной добавки. В случае проведения натуральных экспериментов требуемый объем пробы получают сметанием с бортов или почвы достаточного количества смеси угольной и инертной пыли, после чего пробу перемешивают и отсеивают для удаления крупных вкраплений угля породы.

Далее подготавливают навеску известной массы отобранной пробы для последующего помещения в реакционную колбу с заранее залитым реактивом, состоящем из кислоты и вспомогательных веществ. При проведении эксперимента в условиях шахты для определения необходимого объема пробы используют заранее изготовленный пробоотборник.

После помещения пробы в реактив, размещенный в колбе, колбу закрывают крышкой с размещенной в ней газоотводной трубкой, подключенной к счетчику газа.

Одновременно с закрытием крышки колбы включают счетчик газа.

В течение времени прохождения реакции скорость выделяющегося углекислого газа регистрируется подключённым счетчиком газа.

После окончания реакции в колбе, определяемой по счетчику газа, интегрируется суммарный выход углекислого газа.

На основании выделившегося объема углекислого газа, объема и концентрации реактива в колбе проводится расчет весового содержания инертной пыли в отобранной пробе.

После проведения измерения использованный реактив утилизируют.

Лабораторные эксперименты показали, что использование данной методики позволяет с высокой точностью проводить измерения концентрации инертной пыли в смеси её с угольной пылью. При этом на результат измерения по данной методике не влияют цвет и дисперсный состав угольной и инертной пыли из пробы.

Во время проведения исследований методики на экспериментальной установке также было определено оптимальное время для проведения экспериментов. Это требовалось для улучшения пользовательских свойств разрабатываемой методики, так как упрощало технику проведения эксперимента и делало его более предсказуемым по длительности. По результатам проведенных исследований было установлено, что достаточный и необходимый интервал времени составляет 600 секунд.

На основании разработанной методики и проведенного экспериментального исследования было подготовлено техническое задание для реализации методики в виде электронного устройства с основными требованиями к конструкции прибора.

Выполнение измерений на разработанном техническом устройстве осуществляется на основании разработанной методики, упомянутой выше, при этом все операции, кроме отбора пробы и помещения пробоотборника в колбу, автоматизированы.

Конструкция прибора, а также метод измерения, запатентованы следующими патентами RU138693U1, RU2249816C1, RU37384U1.

Параллельно с разработкой методики были проведены подготовительные работы для создания необходимой нормативной и измерительной базы для возможности проведения испытаний с целью внесения в реестр средств измерений.

Следует отметить, что на момент создания методики и экспериментальной установки в 2004 году в государственном реестре эталонов отсутствовали средства для поверки измерительных систем контроля пылевзрывобезопасности в горных выработках угольных шахт. Данный факт не позволял провести испытания с целью утверждения типа средства измерения разработанного технического средства. Утверждение типа средства измерения осуществляется в целях обеспечения единства измерений, являющегося необходимым условием получения метрологически сопоставимых и совместимых результатов измерений. Более того, в соответствии с «Правилами применения технических

устройств на опасных производственных объектах» (Постановление правительства РФ от 25.12.1998 № 1540) средства измерений должны иметь сертификат об утверждении типа средства измерения.

Для подготовки базы проведения испытаний с целью утверждения типа приборов контроля пылевзрывобезопасности с участием автора был проведен комплекс исследований, который позволил разработать основное средство поверки – стандартные образцы доли инертной пыли в диспергированном угольном порошке (комплект МДПИ). Данный комплект предназначен для поверки, градуировки, калибровки, а также контроля метрологических характеристик при проведении испытаний средств измерений, в том числе с целью утверждения типа средств измерений, предназначенных для контроля пылевзрывобезопасности в горных выработках угольных шахт. Комплект состоит из 11 экземпляров (МД000 – МД100) с последовательно возрастающей долей инертной пыли в диспергированном угольном порошке. Комплект зарегистрирован в установленном порядке, ему присвоен номер 04.06.001 (ГСО 8868-2007).

3. Разработанная методика контроля угольной пыли в воздухе рабочей зоны, основанная на депреометрическом методе измерения, позволяет создавать переносные экспресс-анализаторы оперативного контроля массовой концентрации витающей угольной пыли в любой точке горных выработок для принятия оперативных и эффективных мер по снижению аварийности и профессиональных заболеваний пылевой этиологии.

Рассмотрим методы и приборы, основанные на них, использующиеся для измерения массовой концентрации угольной пыли в воздухе рабочей зоны. В целом данные приборы должны удовлетворять следующим общим характеристикам: иметь приемлемую точность измерений для диапазона возможных концентраций пыли в угольной шахте, иметь необходимые разрешительные документы для эксплуатации на взрывоопасном производстве.

Разделим рассматриваемые методы на две группы: с предварительным осаждением пыли и без предварительного осаждения. В методах с предварительным осаждением следует выделить весовой метод как наиболее точный и применяемый, как эталон для настройки и калибровки ряда приборов, использующих другие методы измерения, но громоздкость оборудования и трудоемкость выполнения анализа не позволяют создать портативный прибор при существующем развитии электронной элементной базы.

Радиоизотопные методы с предварительным осаждением являются достаточно распространенными для использования в портативных приборах и имеют высокую точность измерений, небольшие размеры. К недостаткам следует отнести радиоактивное излучение как психологический фактор, сложную компенсацию влажности пробы в расчетах массовой концентрации угольной пыли в воздухе, а также неосвоенность в массовом производстве.

Остальные методы с предварительным осаждением не получили широкого распространения по разным причинам, в том числе из-за сложной реализации в

виде технических средств и сервисного обслуживания для конечного пользователя.

В методах измерения концентрации витающей угольной пыли без предварительного осаждения лидируют различные вариации оптических методов: абсорбционный, интегрального светорассеивания, голографический, лазерного зондирования. Данные методы измерения, возможно, являются наиболее приемлемыми для реализации экспресс-методик измерения витающей угольной пыли, но все же отметим ряд технических трудностей, которые возникают при реализации данных методов: влияние размеров частиц на погрешность измерения, защита оптических элементов от неблагоприятных условий эксплуатации, потенциальная проблема калибровки приборов в каждом месте измерений из-за различного дисперсного состава пылевого аэрозоля.

На наш взгляд, для переносного технического устройства, используемого для экспресс-анализа концентрации угольной пыли в шахтах, следует использовать методики с предварительным осаждением пробы пыли, как наиболее точные и дающие результаты непосредственно в шахте в точке забора пробы для обеспечения оперативного контроля.

Для решения этой задачи была разработана методика, в которой контролируется изменение аэродинамического сопротивления фильтра при прокачке через него пылевого аэрозоля вследствие осаждения пылевых частиц на поверхности фильтра. Изменение аэродинамического сопротивления фильтра ведет к изменению перепада давления, которое регистрируется соответствующими измерительными устройствами.

В процессе лабораторных исследований и экспериментов была установлена количественная взаимосвязь между массой осевшей пыли и перепадом давления. Данная взаимосвязь используется для создания математической модели и вычисления массовой концентрации пыли в воздухе.

Для отработки методики, которая положена в основу технического устройства, была создана экспериментальная установка, схема которой приведена на рисунке 12.

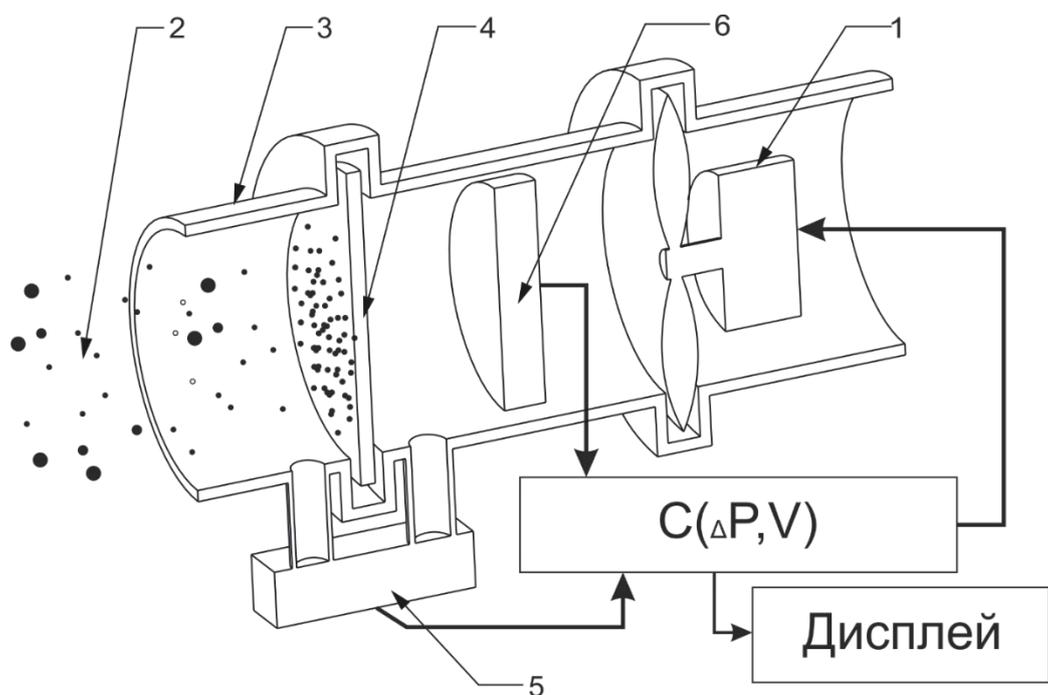


Рисунок 12 – Схема экспериментальной установки для измерения массовой концентрации витающей угольной пыли

Расположенный в установке побудитель расхода (1) создает поток, который засасывает измеряемый пылевой аэрозоль (2) через раструб (3). Далее измеряемая среда поступает на фильтрующий элемент (4), где частицы, находящиеся в воздухе, осаждаются и остаются на фильтре. С ростом количества частиц, осажденных на фильтре (4), возрастает аэродинамическое сопротивление, которое вызывает перепад давления на фильтрующем элементе, регистрируемый датчиком дифференциального давления (5). Объем прошедшего через фильтрующий элемент воздуха (4) регистрируется датчиком расхода воздуха (6).

На экспериментальной установке была проведена отработка блоков и частей измерителя массовой концентрации витающей пыли: выбор фильтрующего элемента, математический алгоритм расчета концентрации пыли, выбор побудителя расхода, оптимизация конструкции прибора для снижения количества элементов. Также были проведены расчеты и оптимизация электронной схемы, позволяющие выполнить требования по взрывобезопасности для использования прибора в угольных шахтах, опасных по взрывам метана и угольной пыли.

Так как одним из основных элементов прибора, отвечающим за точность измерения, является фильтрующий элемент, на котором осаждается витающая угольная пыль, были проведены исследования по подбору оптимального материала для создания сменного фильтрующего элемента. Исследования, выполненные во второй главе, показали, что фильтрующий элемент должен задерживать пылевые частицы с размером выше 2 мкм. Другие требования, выдвигаемые к фильтрующему элементу и отвечающие за возможность использования его в методике, были следующими: высокая эффективность

задержания пыли, равномерность аэродинамического сопротивления, распределённого по площади фильтра, начальная скорость фильтрации должна иметь разброс не более 25 %, изменение аэродинамического сопротивления при наборе пробы пыли должно быть не менее 25 % от начального значения.

После определения аэродинамических характеристик фильтров с использованием установки УПП-1 был выбран тип фильтровальной бумаги, удовлетворяющей всем заявленным требованиям, включая толерантность к влажности и дисперсному составу измеряемого аэрозоля.

Также на экспериментальной установке были проведены исследования по выбору побудителя расхода воздуха, исследованы радиальные, диагональные и центробежные побудители расхода для создания необходимого потока пылевоздушной смеси через фильтрующий элемент. После проведенных исследований и поиска доступных к поставкам насосов, автором был сконструирован специальный центробежный насос с необходимыми параметрами, обеспечивающими расход пылевоздушной смеси через выбранный фильтрующий элемент порядка 10 – 20 л/мин.

Исходя из измеренного перепада давления, возникающего на фильтрующем элементе, был подобран высокочувствительный датчик перепада давления, основанный на термоанемометрическом принципе – при возникновении разности давлений в измерительном канале возникает воздушный поток, скорость которого регистрируется МЭМС термоанемометром. Данный подход позволил достичь высокой точности измерения перепада давления, высокой стабильности параметров измерения, простой и быстрой калибровки датчика.

На основании полученных результатов об аэродинамических характеристиках фильтрующего элемента и побудителя расхода воздуха была создана математическая модель измерения запыленности воздуха, которая позволяет проводить вычисление массовой концентрации пылевого аэрозоля.

Для регистрации всех параметров работы экспериментальной установки был разработан программный комплекс, состоящий из ПО для стационарного компьютера и ПО для встроенного в установку управляющего микроконтроллера. Данный программный комплекс решает следующие задачи: калибровка и предварительная настройка прибора, сервисное обслуживание прибора, возможность обновления встроенного программного обеспечения, отображение встроенного лог-файла измерений прибора. Использование в побудителе расхода (насосе) бесколлекторного двигателя потребовало разработки программного обеспечения для МК по управлению двигателем: плавному запуску и поддержанию необходимого количества оборотов вне зависимости от степени разряжения воздуха и состояния системы электропитания.

Конструкция экспериментальной установки и разработанное встроенное программное обеспечение позволили создать прототип технического средства для измерения массовой концентрации пыли. Прототип технического устройства был изготовлен в 2005 году по технологии SLS – прямым спеканием

полиамидного порошка лазерным лучом. Экспериментальное техническое устройство весит 950 грамм, время измерения не превышает 180 секунд: специальный адаптивный алгоритм измерения варьирует время отбора пробы от 180 секунд при низкой запыленности до 15 секунд при высокой запыленности. Конструкция экспериментального технического устройства защищена патентами RU174829U1, RU80502U1, RU38837U1.

На основе данной методики могут быть разработаны технических устройств для проведения экспресс-оценки пылевой обстановки в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. Отличительными особенностями таких технических устройств будут: возможность проводить измерения и индикацию результатов непосредственно в точке измерения, отсутствие дополнительной калибровки прибора на точке измерения, малое время измерения – до 3-х минут, позволяет измерять высокие массовые концентрации пылевого аэрозоля.

При разработке экспериментальной установки было учтено, что техническое устройство должно иметь необходимые разрешения на применение в шахтах, опасных по взрывам метана и угольной пыли.

4. Созданная методика измерения витающей угольной пыли, основанная на рассеянии инфракрасного излучения в пылевом облаке, с новым принципом защиты оптических элементов позволяет разрабатывать технические устройства, обеспечивающие необходимой информацией систему управления охраной труда для принятия оперативных и эффективных мер по снижению аварийности и профессиональных заболеваний пылевой этиологии.

При рассмотрении методов измерения витающей угольной пыли во время разработки методики экспресс-оценки пылевой обстановки, существующие методы контроля можно разделить на методы с предварительным осаждением и методы без предварительного осаждения. По физическим свойствам методов измерения наиболее распространенными являются: нефелометрический, гравиметрический и фотометрический. Методы с предварительным осаждением заведомо дают более высокую точность, но сложны в автоматизации измерений. Поэтому добавим дополнительный критерий при выборе метода – возможность использования метода в автоматическом режиме с минимальным вмешательством человека.

Приборы, основанные на осаждении пыли на ленту или сменные фильтры, содержат сложные системы лентопротяжного механизма, смены фильтров, и зачастую не могут работать при запыленности воздуха, встречающейся в шахтах. Тяжелые условия эксплуатации приборов: наличие постоянного потока воздуха, изменение влажности, наличие капельной взвеси воды, которая совместно с угольной пылью образует сложноудаляемый налет с поверхности движущихся механизмов, использование распылителей инертной пыли, создающей мгновенную концентрацию инертной пыли в воздухе более 4000 мг/м³ в области работы стационарных измерителей – приводят к гарантированному засорению, заклиниванию подвижных частей измерителей массовой концентрации

витающей угольной пыли. Все это накладывает жесткие требования на конструкцию любых подвижных деталей прибора. Одним из наиболее распространенных приборов, позволяющих измерять концентрацию пыли в автоматическом режиме, является газоанализатор ГАНК-4, использующий сменные кассеты для осаждения пыли.

Среди методов, не использующих осаждение, наиболее распространенными являются трибоэлектрические и оптические методы измерения.

Трибоэлектрический метод основан на измерении наведенного (индуцированного) заряда на электроде, электрически не связанном с измеряемой цепью. Наведенный заряд возникает при взаимодействии частиц с поверхностью электрода, при этом величина заряда напрямую связана с массовой концентрацией заряда в достаточно широком диапазоне измеряемых концентраций витающей пыли. К недостаткам трибоэлектрических методов измерения следует отнести существенное влияние влажности и скорости движения потока, несущего аэрозольные частицы на показания прибора. Приборы, изготавливаемые на основе данного метода: AUBURN SYSTEMS 2000 SERIES, Sintrol Snifter A1+.

Оптические методы разделены на две группы: измеряющие ослабление или рассеяние зондирующего излучения. Стационарные приборы, измеряющие ослабление светового потока, хорошо зарекомендовали себя при измерении промышленных выбросов с установкой в дымоходах промышленных предприятий (примером может служить измеритель ПЕРГАМ ПАСК 2000/2100). Приборы, использующие для измерения принцип рассеяния света, менее распространены в силу более сложной конструкции (SICK DUSTHUNTER SB100, DURAG GROUP D-R 320).

Оптические методы, без использования осаждения пыли на носителе, подвержены комплексу проблем, связанных с загрязнением оптических элементов, являющихся важными (с точки зрения точности измерения) конструктивными элементами прибора.

Изученные представители промышленно выпускаемых приборов, а также фактическое отсутствие на угольных шахтах приборов стационарного автоматического контроля пылевой обстановки, являющихся важным инструментом для получения реальных оперативных данных о состоянии атмосферы, показали актуальность создания новой методики измерения.

Идея методики заключается в измерении концентрации витающей угольной пыли с совместным использованием абсорбционного принципа и принципа рассеяния света, исключением из оптической схемы приемного тракта защитных стекол, на которые происходит осаждение пыли, и замены их потоком чистого воздуха. Для реализации данной идеи был проведен комплекс лабораторных исследований, позволивший создать экспериментальную установку, работающую в полностью автоматическом режиме и измеряющую концентрацию пыли до 1000–1500 мг/м³.

Диапазон размеров контролируемой части 1–100 мкм в соответствии с теоретическими исследованиями, выполненными в том числе автором, и общеизвестными данными о витающей пыли в воздухе.

На основании теоретических исследований, выполненных во второй главе, были определены параметры фильтрующих элементов для очистки воздуха и оптимальная длина волны излучения для зондирования воздушного потока.

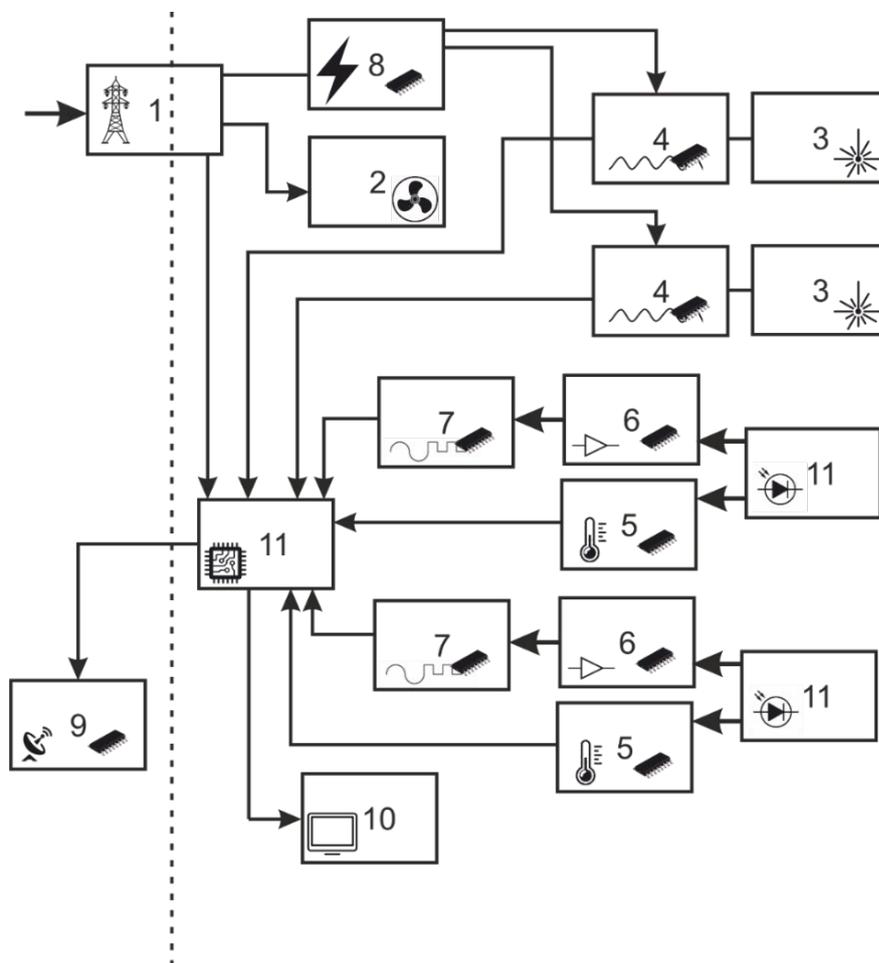


Рисунок 14 – Функциональная схема прибора экспериментальной установки. 1 – система электропитания установки; 2 – вентилятор; 3 – оптический излучатель; 4 – блок управления оптическим излучателем; 5 – контроль температуры фотоприемника; 6 – усилитель фотоприемника; 7 – АЦП; 8 – блок управления мощностью; 9 – система обмена информацией; 10 – дисплей; 11 – фотоприемник

Для разработки функциональной модели, приведенной на рисунке 14, и подтверждения возможности работы оптической системы измерителя пыли был проведен комплекс экспериментальных исследований на установке УПП-1:

1. Экспериментальные исследования оптических свойств аэрозоля различных марок угля, показавшие, что исследуемые марки угля ДО, Г, Ж, К, А не имеют значимых отличий для измерения выбранным методом.

2. Экспериментальные исследования измерения концентрации пылевого аэрозоля до 1500 мг/м³. Исследования по измерению высоких концентраций

пылевого аэрозоля подтвердили необходимость защиты оптических элементов измерителя от налипания частиц пыли.

3. Экспериментальные исследования параметров системы подачи воздуха для защиты оптических элементов. Требуется соблюсти баланс между необходимым избыточным давлением в оптическом измерительном канале и расходом воздуха, не влияющим на движение пылевых частиц в измерительной камере.

4. Создание защитного покрытия для оптических элементов.

Далее на основе экспериментальной установки была разработана конструкция технического средства для проведения дальнейших испытаний методики. Техническое средство (рисунок 15) состоит из: корпуса (11) с расположенными на нем коробкой подключения к системе АГК (12), клавиатуры с дисплеем (6), источников излучения (1) и (5), фотоприемника (8) и оптических ловушек (9) и (7), измерительной камеры (3), вычислительного устройства (4), вентилятора подачи воздуха (2), фильтра тонкой очистки (10).

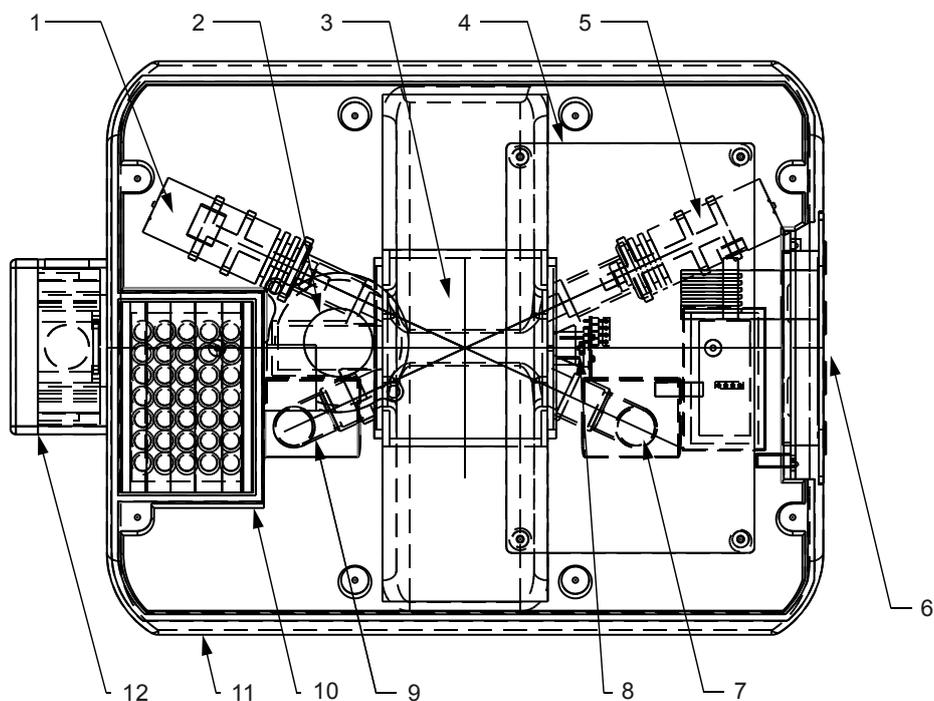


Рисунок 15 – Конструкция прибора ИЗСТ-01

Данная конструкция и ее вариации защищены патентами RU186970U1, RU80503U1, RU72547U1, RU61883U1.

Витающая в воздухе угольная пыль, находящаяся в свободном движении из-за флуктуаций воздуха либо под воздействием движения воздуха вследствие работающих вентиляционных установок в шахте, попадает в измерительную камеру. Два источника излучения, управляемые вычислительным устройством, облучают проходящую пыль; фотоприемники, соединенные с усилителем аналогового сигнала, принимают отраженное и ослабленное излучение и передают его на обработку в вычислительное устройство. В вычислительном

устройстве данные о внешней освещенности, уровне ослабленного и рассеянного излучения обрабатываются, вычисляется массовая концентрация пыли. Вычисленная массовая концентрация пыли передается в систему АГК и индицируется на устройстве отображения информации, установленном на приборе.

Для защиты от оседания пыли сконструирована специальная измерительная камера, оптические элементы защищены методом обдува чистым воздухом. Необходимое количество чистого воздуха получается на месте, в корпусе прибора с использованием центробежного вентилятора и фильтра тонкой очистки. Срок службы фильтра рассчитан на время межповерочного интервала.

Массовое внедрение автоматического непрерывного измерителя запыленности началось после тяжелых аварий, вызвавших большие человеческие жертвы и разрушения объектов инфраструктуры.

5. Концептуальная модель, основанная на новом определении человеческого фактора как изменяющейся во времени и пространстве разности между фактическим уровнем способностей и требуемым уровнем способностей человека, позволит снизить уровень травматизма и профессиональной заболеваемости на предприятиях горной промышленности за счет массового внедрения систем управления человеческим фактором, обеспечивающих целенаправленное развитие и поддержание требуемых способностей работника.

На предварительном этапе разработки модели человеческого фактора была построена многоуровневая модель компетентности работников в сфере охраны труда.

В основе предлагаемой модели лежит определение, приведенное в ГОСТ ISO 9000-2011: «Компетентность (competence) – продемонстрированная способность применять знания и навыки на практике».

Далее на основе этого определения получаем следующие расширенные определения.

Фактическая компетентность (фактический комплекс способностей) – это продемонстрированная способность безопасно выполнять заданную работу, базирующаяся на основных составляющих: интеллектуальной, сенсорной, защитной, физической и с учетом прав и обязанностей работника.

Требуемая компетенция (требуемый комплекс способностей) – совокупность требований к интеллектуальным, сенсорным, защитным и физическим способностям человека, которые необходимы для безопасного выполнения заданной работы с учетом прав и обязанностей работника.

В дальнейшем, с целью удобства понимания, вместо термина **компетентность** будем использовать термин **комплекс способностей**, считая их в рамках данной работы эквивалентными.

Рассмотрим более подробно комплекс способностей, приведенных в определении.

Интеллектуальные способности – способности практического использования знаний, навыков, опыта своих прав и обязанностей для выполнения работы с минимальным риском вреда здоровью.

Сенсорные способности – естественные способности при помощи органов чувств (органы зрения, слуха, обоняния, осязания) контролировать опасности окружающей среды.

Защитные способности – это естественные способности (выносливость) переносить определенные нагрузки факторов среды (физические, химические, биологические) и трудового процесса (тяжесть, напряженность) без вреда здоровью.

Физические способности – это набор естественных способностей (качеств) человека (быстрота, сила, выносливость, ловкость, гибкость) необходимых для выполнения заданных действий.

Следует отметить, что интеллектуальные способности, как правило, являются доминирующими – для правильной реализации сенсорной, защитной и физической способностей нужны соответствующие знания, навыки и опыт.

Рассмотрим ограничения, возникающие вследствие воздействия на работника условий окружающей среды, включая условия труда.

Данные положения можно проиллюстрировать при помощи закона толерантности Шелфорда, который гласит, что «лимитирующий фактор процветания организма может быть, как минимумом, так и максимумом экологического фактора, диапазон между которыми определяет пределы толерантности организма к данному фактору. Организм может иметь широкие границы устойчивости в отношении одного фактора и узкие в отношении другого»¹.

Для разделения степени воздействия окружающей среды обратимся к классам условий труда, которые хорошо квантифицированы каждому классу поставлены в соответствие численные нормы опасных и вредных факторов рабочей среды, а также нормы тяжести и напряженности трудового процесса. Установка класса условий труда для каждого рабочего места происходит с использованием процедур закона «О специальной оценке условий труда», следовательно, четко регламентирована.

Иллюстрацией закона толерантности Шелфорда с учетом классов условий труда служит график, приведенный на рисунке 16.

¹ Shelford, V. E. Some Concepts of Bioecology // Ecology. 1931. 12(3). С. 455–467.

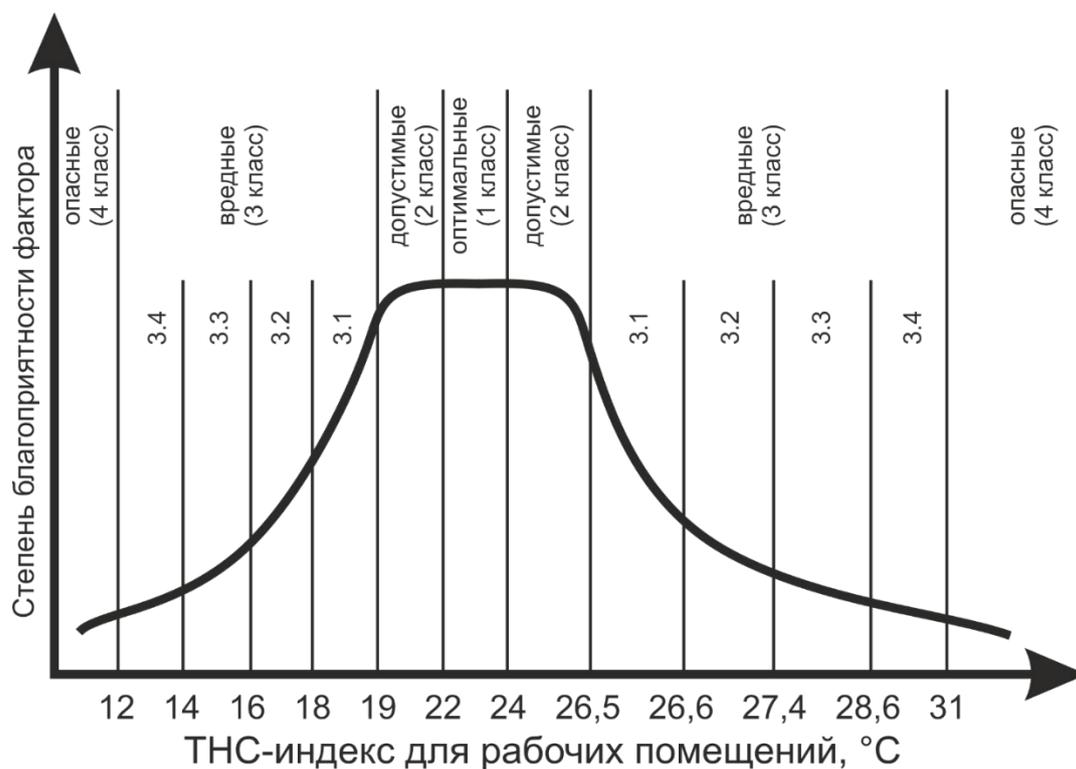


Рисунок 16 – Графическая иллюстрация закона толерантности Шелфорда с учетом классов условий по фактору температура

Как видно из рисунка 16, классы 1 и 2 находятся в зоне оптимальной и нормальной жизнедеятельности, классы условий труда выше второго (классы 3 и 4) характеризуются постоянным превышением допустимых уровней нагрузки, работа происходит в зоне угнетения жизнедеятельности и, как установлено на практике, приводит к профессиональным заболеваниям. Работа в опасных условиях труда, соответствующих 4 классу, может привести к гибели даже в течение одной рабочей смены. Классы условий труда накладывают ограничения на все способности человека – интеллектуальные, сенсорные, защитные и физические.

Предлагается использовать три основных уровня комплекса способностей:

- I. Исходный уровень комплекса способностей (ИКС).
- II. Допустимый уровень комплекса способностей (ДКС).
- III. Недостижимый уровень комплекса способностей (НКС).

И три дополнительных:

- Требуемый (рабочий) уровень комплекса способностей (ТКС).
- Добавленные уровни комплекса способностей (ДКС₁, ДКС₂).

Первый добавленный уровень способностей (ДКС₁) – это величина расширения способностей выше исходного уровня за счет развития интеллектуальной, сенсорной, защитной, физической составляющих компетентности вплоть до допустимого уровня компетентности:

1. Интеллектуальных способностей – за счет обучения, обретения навыков и опыта в части безопасных методов и приемов безопасного выполнения работ.

2. Сенсорных способностей – за счет развития сенсорной системы в процессе работы – своевременная фиксация признаков различных опасностей.

3. Защитных способностей – как правило, за счет адаптационных свойств человеческого организма.

4. Физических способностей – за счет освоения оптимальных и безопасных трудовых движений, действий, приёмов в процессе работы.

Второй добавленный уровень способностей (ДКС₂) – это величина расширения способностей выше допустимого уровня за счет искусственных средств увеличения интеллектуальной, сенсорной, защитной и физической составляющих компетентности:

1. Интеллектуальных способностей – за счет оснащения работника необходимыми техническими средствами, обеспечивающими возможность быстрого и обоснованного решения по вопросам ОТ (персональные компьютеры, электронные планшеты, смартфоны и т. п.).

2. Сенсорных способностей – за счет оснащения работника техническими средствами контроля окружающей среды (приборы контроля условий труда и т.п.).

3. Защитных способностей – за счет оснащения работника средствами индивидуальной (коллективной) защиты от опасных и вредных производственных факторов.

4. Физических способностей – за счет оснащения работника специальными техническими средствами (инструментами, экзоскелетами и т. п.).

Предлагаемая многоуровневая модель компетентности позволяет комплексно, с учетом требований работы и условий труда, используя различные приемы управления способностями человека, добиться расширения комплекса способностей работников до требуемого уровня.

Учитывая тот факт, что расширенное определение компетентности и существующие определения человеческого фактора, опирающиеся на различные способности работника, в целом коррелируют друг с другом, человеческий фактор можно описать с помощью простой формулы:

$$\text{ЧФ} = \text{ФКС} - \text{ТКС}, \quad (12)$$

где ЧФ – человеческий фактор; ТКС – требуемый уровень способностей человека; ФКС – фактический уровень способностей человека.

Исходя из соотношения (12), человеческому фактору можно дать следующее определение.

Человеческий фактор – это изменяющаяся во времени и пространстве разность между фактическим уровнем способностей человека и требуемым уровнем способностей.

Здесь и в дальнейшем будем использовать понятия и определения, приведенные выше в многоуровневой модели компетентности (комплекса способностей) работников в сфере охраны труда.

Например.

1. Если ФКС меньше ТКС, то ЧФ – отрицательная величина и возможны неправильные, опасные действия работника и, как следствие, инциденты, аварии и травмы.

2. Если ФКС больше ТКС, то ЧФ – положительная величина и следует ожидать качественного и безопасного выполнения работы.

3. При равенстве ФКС и ТКС влияние человеческого фактора равно нулю.

Необходимость введения в определение фактора времени объясняется тем, что способности человека обычно изменяются с течением времени. Приведем простой пример. Травматизм работников с малым стажем относительно высок и превышает средний в два-три раза, что объясняется малоразвитыми интеллектуальными способностями работника – необходимые для безопасного выполнения работы знания, навыки и опыт малы. По мере нарастания стажа у работника появляются перечисленные выше способности необходимого качества и, как следствие, травматизм у работника – ниже среднего. В предпенсионном возрасте у работника снижаются сенсорные, защитные, физические способности, и, как следствие, травматизм у этой группы людей выше среднего.

Изменение ЧФ в пространстве обусловлено тем, что, например, рабочая зона может содержать пространственно разделенные источники различных опасностей с разными ТКС.

Формулу (12) можно представить в несколько другом виде. Разделим ЧФ и ФКС на ТКС. В результате этого получим долю влияния человеческого фактора:

$$\Delta\text{ЧФ} = \Delta\text{ФКС} - 1, \quad (13)$$

где $\pm \Delta\text{ЧФ}$ – доля влияния человеческого фактора; $\Delta\text{ФКС}$ – доля соответствия фактического уровня требуемому уровню способностей человека.

В общем виде человеческий фактор можно представить (рисунок 16) геометрической фигурой ромб.

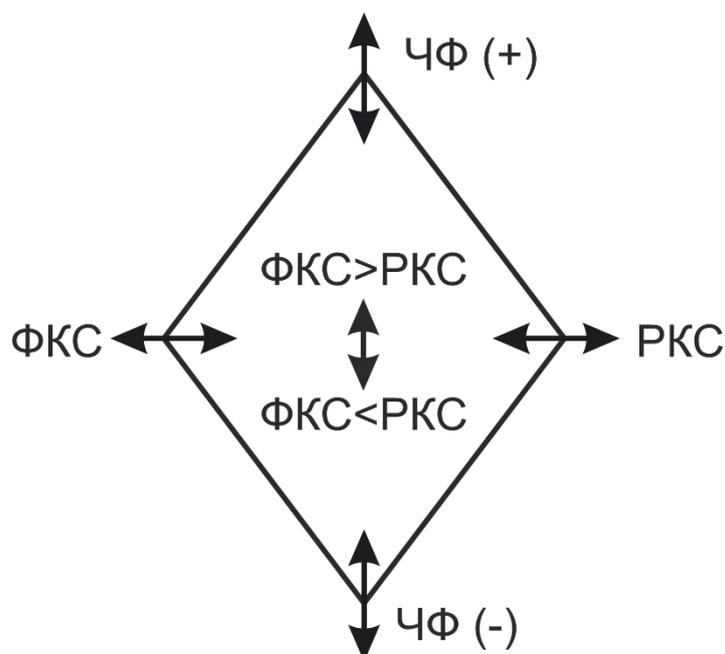


Рисунок 16 – Геометрическое представление человеческого фактора

Стрелками указаны возможные изменения показателей человеческого фактора. ЧФ (+) показывает область значений ЧФ, в которой следует ожидать качественное и безопасное выполнение работы. ЧФ (-) определяет область в которой возможны неправильные, опасные действия работника и, как следствие, инциденты, аварии и травмы.

Следует отметить, что совокупность определений и понятий, таких как человеческий фактор, компетенция, компетентность, классы условий труда, способности, требуемый и необходимый уровень способностей и т. д., определения которых даны выше, являются концептуальной моделью человеческого фактора, которая органично вписывается в систему управления охраной труда и открывает путь к созданию различных персональных систем управления человеческим фактором.

Проведенный обзор показал, что отсутствуют (не обнаружены) модели персонального управления человеческим фактором, которые включали бы сбор при помощи органов чувств или соответствующих средств контроля сведений об опасностях, возникающих во время работы, оценку этих опасностей и принятие соответствующих мер по их устранению с использованием знаний, умений и навыков выполнения безопасных методов и приемов выполнения работы и т. п.

Принципиальная схема системы управления человеческим фактором в рамках производства приведена на рисунке 17. Напомним, что системы управления человеческим фактором являются составляющей частью действующих систем управления охраной труда в масштабе предприятия. Структуру предлагаемой системы управления можно отнести к классу «Автоматизированная система управления» с участием человека в контуре управления. В результате использования терминов и понятий модели человеческого фактора получилась достаточно простая схема управления человеческим фактором в рамках производства.

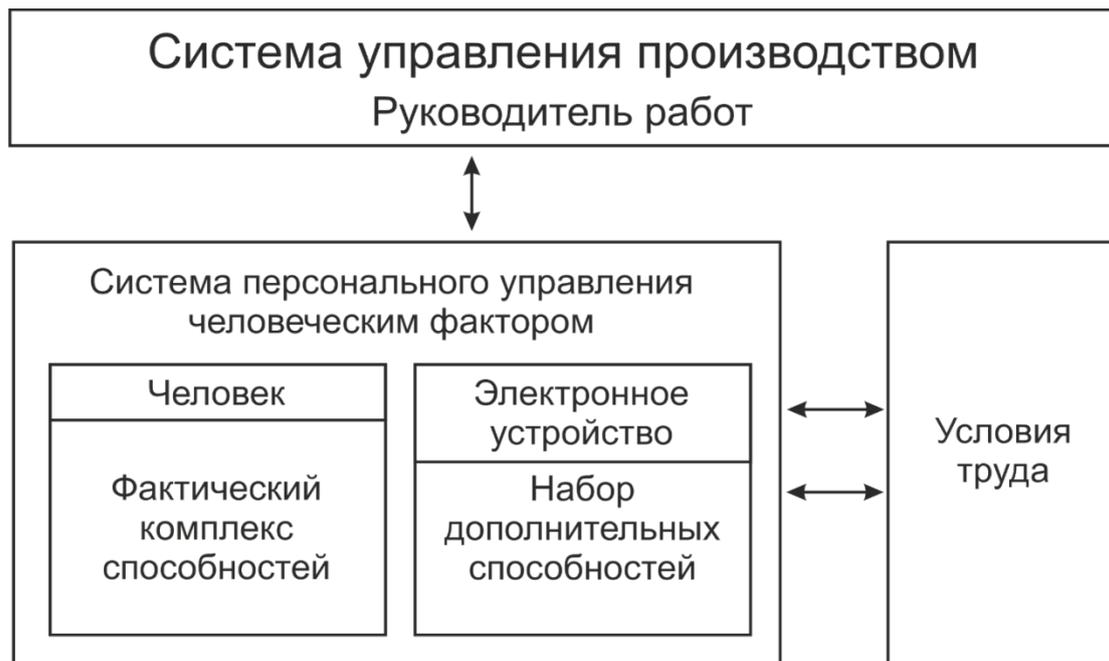


Рисунок 17 – Принципиальная схема управления человеческим фактором в рамках производства

Система управления производством в лице руководителя работ выдает работнику задание, наряд на выполнение конкретной работы. Система анализирует содержание работы и в нужный момент, на определенном этапе работы, формирует комплекс необходимых дополнительных способностей с использованием электронного носителя. Электронный носитель автоматически или под управлением работника контролирует состояние условий труда и в случае их изменений в худшую сторону информирует об этом работника и предлагает возможные варианты действий по обеспечению безопасности.

Данная система управления человеческим фактором предназначена для управления (расширения) комплексов интеллектуальных и сенсорных способностей до требуемого уровня, в части защитных и физических способностей система дает рекомендации, когда, какие и при помощи чего необходимо усилить защитные, физические возможности.

Важная роль в управлении человеческим фактором отводится некоторой электронной системе, являющейся носителем дополнительных интеллектуальных и сенсорных способностей работника.

С целью выбора электронного носителя дополнительных способностей был проведен обзор электронных планшетов (требования эргономики), выполненных во взрывобезопасном исполнении (требования условий труда).

Отметим, что разработанное многофункциональное устройство «Умный напарник» полностью удовлетворяет тем требованиям, которые персональная система управления человеческим фактором предъявляет к электронным носителям.

1. Обеспечивает хранение и удобное представление дополнительных интеллектуальных способностей работника.

«Умный напарник» позволяет хранить в памяти устройства одновременно: 100000 страниц текстовой и графической информации; свыше 100 часов видеофильмов; содержать современное программное обеспечение для проведения сложных расчетов непосредственно в шахте.

Обеспечение дополнительных интеллектуальных способностей работника осуществляется и при помощи системы фото- и видеofиксации производственной обстановки.

2. Расширение сенсорных способностей работника происходит за счет встроенных и подключаемых датчиков контроля условий труда.

Так, встроенный тепловизор позволяет проводить дистанционный контроль нагретых поверхностей.

После окончания разработки многофункционального устройства была проведена необходимая сертификация устройства для возможности эксплуатации в шахтах, опасных по взрывам пыли и газа, и получен сертификат, подтверждающий уровень взрывозащиты PO Ex ia I X. В дальнейшем сертификат был расширен и на взрывоопасные производства, связанные с добычей и переработкой нефти и газа – 0Ex ia IIC T4 X.

На рисунке 18 приведен пример применения схемы персональной системы управления человеческим фактором на примере пылевого фактора с использованием устройств, разработанных автором.

Управление Человеческим фактором

$$\text{ЧФ} = \text{ФКС} - \text{ТКС}$$

КС → интеллектуальные, сенсорные, физические и защитные способности

$$\text{ФКС} + \text{ДКС} > \text{ТКС} \quad (\text{Пылевой фактор})$$

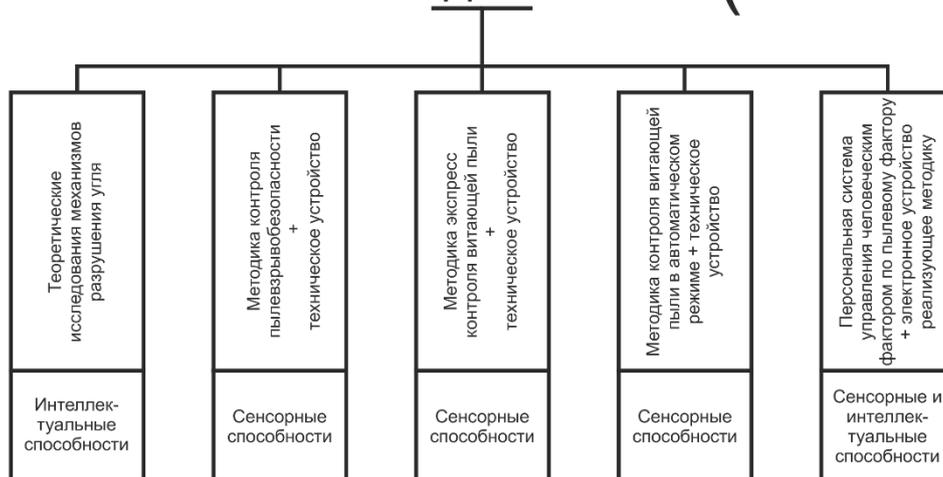


Рисунок 18 – Принципиальная схема персональной системы управления человеческим фактором (пылевой фактор)

Персональная система управления человеческим фактором позволяет четко продемонстрировать управление человеческим фактором в результате выполненных в данной работе исследований:

– теоретические и экспериментальные исследования по изучению разрушения угля и процессов пылеобразования формируют новые знания и подходы к созданию средств и методов, обеспечивающих безопасность работ в угольных шахтах, и, как следствие, обеспечивают рост интеллектуальной составляющей человеческого фактора;

– комплекс новых методик и средств контроля пылевой обстановки горных выработок угольных шахт резко повышает сенсорные способности человека и позволяет, в случае необходимости, более оперативно принимать управленческие решения по обеспечению безопасности труда;

– техническое устройство для персональной системы управления человеческим фактором обеспечивает рост интеллектуальных и сенсорных способностей человеческого фактора до необходимого уровня.

Массовое внедрение систем управления человеческим фактором на государственном уровне, на уровне предприятия и персональных систем управления на уровне работника позволит снизить уровень травматизма и профессиональной заболеваемости на предприятиях горной промышленности за счет целенаправленного развития и поддержания необходимых способностей работника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалифицированной работой, в которой решена крупная научно-техническая проблема, имеющая важное хозяйственное значение, связанная с обеспечением комплексного оперативного контроля пылевой обстановки горных выработок в угольных шахтах, что в конечном итоге имеет большой социально-экономический эффект в виде снижения рисков аварий и профессиональных заболеваний пылевой этиологии за счет принятия своевременных управленческих решений на базе данных объективного пылевого контроля.

Также в рамках реализации комплексного подхода по контролю пылевой обстановки в горных выработках угольных шахт в работе изложена математическая модель разрушения угля с элементами мезомеханики, а также экспериментальные исследования разрушения угля, что может послужить дальнейшему развитию исследований процессов разрушения и пылеобразования, и, кроме того, предложена новая концептуальная модель человеческого фактора и системы управления охраной труда на ее основе.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Посредством математического моделирования на основе модели упруго-вязкопластической деформации и разрушения угля на мезоскопическом масштабном уровне установлено, что при любых типах нагружения разрушение угля происходит с преобладанием выхода фракций 0–10 мкм. Результаты математического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными

данными, что подтверждает широкие возможности математической модели упруго-вязкопластической деформации и разрушения угля на мезоскопическом масштабном уровне производить исследования процессов пылеобразования, которые трудно реализовать на современных экспериментальных установках.

2. Экспериментальные исследования различных марок углей с использованием компьютерной томографии позволили установить, что на интервале от 100 мкм до 50 мм пространственная пористая структура каменных углей носит ярко выраженный фрактальный характер с размерностью $D = 2,35 - 2,58$, что предъявляет дополнительные требования к математическим моделям пылеобразования при разрушении углей и моделям, описывающим движение метана в угольных пластах и выбросы угля и газа. Фрактальный характер внутренней структуры углей объясняет фрактальную размерность ($D_R \sim 2,5$) константы скорости низкотемпературного окисления угля, которая является важной характеристикой эндогенной пожароопасности.

3. Разработана методика оперативного контроля пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт на основе прямого измерения выхода диоксида углерода из отобранной пробы смеси инертной и угольной пыли, которая реализована в виде технического устройства со временем измерения 10 минут.

4. Создан государственный стандартный образец, обеспечивающий единство измерений содержания доли инертной пыли в смеси инертной и угольной пыли для проведения действий по поверке и настройки оборудования, обеспечивающего контроль пылевзрывобезопасности.

5. Разработана методика, основанная на контроле изменения аэродинамического сопротивления фильтрующего элемента при прохождении через него пылевоздушной смеси в течение заданного времени (депремометрический метод), при этом время прокачивания пылевоздушной смеси меняется в зависимости от массовой концентрации угольной пыли в воздухе горных выработок.

6. Установлено, что разработанная депремометрическая методика для контроля массовой концентрации пыли в воздухе рабочей зоны позволяет создавать технические устройства оперативного измерения (время измерения до 3-х мин.) и индикации параметров пылевого аэрозоля непосредственно в месте контроля.

7. Разработана методика измерения массовой концентрации витающей угольной пыли в воздухе рабочей зоны, основанная на рассеянии оптического излучения со специальным методом защиты оптических элементов от пыли.

8. Разработанная оптическая методика позволяет создавать новые технические устройства в составе систем АГК для непрерывного автоматического контроля и измерения витающей угольной пыли с возможностью передачи данных на диспетчерский пульт шахты с целью принятия оперативных решений по управлению охраной труда.

9. С опорой на многоуровневую модель компетентности (комплекса способностей) работников в сфере охраны труда построена концептуальная

модель человеческого фактора, в которой он определен как изменяющаяся во времени и пространстве разность между фактическим уровнем способностей человека и требуемым уровнем способностей. Показано, что в рамках данной модели человеческий фактор может быть как отрицательной величиной, характеризуя свое негативное влияние на безопасность, так и положительной величиной, что позволяет ожидать качественное и безопасное выполнение работы.

10. Установлено, что управление человеческим фактором можно осуществлять при помощи действующей в России системы управления охраной труда. Предложена концептуальная модель персональной системы управления человеческим фактором на уровне работника, создано электронное взрывобезопасное устройство (планшет «Умный напарник»), являющееся носителем дополнительных интеллектуальных и сенсорных способностей работника.

Научные результаты работы отражены в следующих публикациях:

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК России:

1. Ворошилов Я.С. Выбор и оптимизация профиля приемной трубки анемометра АР-П / Я.С. Ворошилов, Д.С. Хлудов, А.А. Поморцев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 39–43.

2. Попов М.С. Исследование влияния влажности, вещественного и дисперсного составов пылевого аэрозоля на показания прибора ПКА-01 / М.С. Попов, С.И. Голоскоков, Д.В. Ботвенко, Я.С. Ворошилов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 47–52.

3. Ворошилов Я.С. Разработка, модернизация и производство приборов контроля параметров безопасности ведения горных работ / Я.С. Ворошилов, М.С. Попов, Д.А. Трубицына, Р.С. Самсонов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 53–56.

4. Ворошилов Я.С. Автоматизированные системы экологического мониторинга производственных предприятий и экологически неблагоприятных районов Кемеровской области / Я.С. Ворошилов, М.С. Попов, Д.А. Трубицына, Р.С. Самсонов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 57–60.

5. Ворошилов С.П. Влияние влаги на окисление каменных углей / С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов, А.С. Ворошилов, В.А. Уварова // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 68–82.

6. Ворошилов Я.С. Повышение точности измерения низкой скорости воздуха с помощью анемометра АР-П / Я.С. Ворошилов, А.А. Поморцев, Д.С. Хлудов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – № 1. – С. 73–77.

7. Попов М.С. Опыт промышленной эксплуатации измерителя запыленности стационарного ИЗСТ-01 / М.С. Попов, Я.С. Ворошилов,

Д.А. Трубицына, Р.С. Самсонов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – № 1. – С. 78–81.

8. Поморцев А.А. Разработка датчика контроля параметров дегазационной сети / А.А. Поморцев, Я.С. Ворошилов, В.Е. Седельников, М.К. Дарчук // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – № 2. – С. 35–38.

9. Лаптев А.С. Модернизация измерителя запыленности стационарного ИЗСТ-01 / А.С. Лаптев, М.С. Попов, Я.С. Ворошилов, Д.А. Трубицына // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – № 2. – С. 38–40.

10. Тимошенко А.М. Анализ существующих способов проветривания тупиковых подготовительных выработок / А.М. Тимошенко, Д.В. Никифоров, Я.С. Ворошилов, А.А. Поморцев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – № 2. – С. 54–64.

11. Макаров П.В. Моделирование устройства измерения скорости воздушного потока / П.В. Макаров, И.М. Васенин, Я.С. Ворошилов, А.А. Поморцев, Д.С. Хлудов, В.Е. Седельников, М.К. Дарчук // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 1. – С. 102–107.

12. Ворошилов Я.С. Разработка программного обеспечения для калибровки стационарного датчика контроля запыленности воздуха ИЗСТ / Я.С. Ворошилов, В.Е. Седельников, Д.А. Трубицына, А.С. Подображин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 1. – С. 108–110.

13. Ворошилов Я.С. Модернизация прибора контроля пылевзрывобезопасности ПКП / Я.С. Ворошилов, А.А. Поморцев, В.Е. Седельников, М.К. Дарчук, В.А. Сухоруков // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 1. – С. 117–120.

14. Поморцев А.А. Исследование источников погрешности системы контроля параметров дегазационной сети при измерении расхода газа / А.А. Поморцев, Я.С. Ворошилов, М.С. Попов, А.А. Христофоров, В.Е. Седельников, М.К. Дарчук // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 2. – С. 80–88.

15. Ворошилов Я.С. Выбор оптимальной конфигурации рабочего пространства анемометра АР-П по результатам компьютерного моделирования / Я.С. Ворошилов, В.Е. Седельников, Д.С. Хлудов, А.А. Поморцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск 5. Аэрология. – 2008. – С. 218–222.

16. Ворошилов Я.С. Разработка программного обеспечения для стационарного датчика контроля запыленности воздуха ИЗСТ / Я.С. Ворошилов, В.Е. Седельников // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск 5. Аэрология. – 2008. – С. 223–225.

17. Ворошилов Я.С. Разработка программного комплекса для регистрации параметров работы прибора контроля запыленности воздуха ПКА-01 /

Я.С. Ворошилов, В.Е. Седельников, А.С. Ярош // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск 5. Аэрология. – 2008. – С. 226–232.

18. Ворошилов С.П. Исследования каменных углей с использованием рентгеновской томографии / С.П. Ворошилов, В.А. Клименов, Б.И. Капранов, Я.С. Ворошилов, А.С. Ворошилов, Д.А. Трубицына, А.В. Батрагин, Е.В. Мазаник // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 1-2. – С. 5-12.

19. Ворошилов Я.С. Исследования фрактальной структуры угля методами компьютерной томографии / Я.С. Ворошилов, А.Н. Коков // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 49–57.

20. Ворошилов Я.С. Разработка метода и системы контроля интенсивности пылеотложений для повышения уровня пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт / Я.С. Ворошилов, Д.А. Трубицына // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 4. – С. 28–41.

21. Фомин А.И. Исследование влияния угольной пыли на безопасность ведения горных работ / А.И. Фомин, Я.С. Ворошилов, Д.Ю. Палеев // Горная промышленность. – 2019. – № 1 (143). – С. 33–36.

22. Ворошилов Я.С. Влияние угольной пыли на профессиональную заболеваемость работников угольной отрасли / Я.С. Ворошилов, А.И. Фомин // Уголь. – 2019. – № 4. – С. 20–24.

23. Ворошилов Я.С. Многоуровневая модель компетентности работников в сфере безопасности труда / Я.С. Ворошилов // Горная промышленность. – 2020. – № 2. – С. 125–129.

24. Ворошилов Я.С. Модель компетентности работников в сфере безопасности труда / Я.С. Ворошилов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (51). – С. 25-29.

Патенты на изобретения:

25. Пат. № 80 503 Российская Федерация, МПК E21F 5/00 (2006.01) Датчик для измерения концентрации пыли / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Я.С. Ворошилов, Д.А. Трубицына, М.С. Попов, В.Е. Седельников; заявитель и патентообладатель ООО «Горный ЦОТ» – № 2008138657/22, заявл. 29.09.2008; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4. – 6 с.

26. Пат. № 80 502 Российская Федерация, МПК E21F 5/00 (2006.01) Прибор для измерения концентрации пыли / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Я.С. Ворошилов, Д.А. Трубицына, М.С. Попов, В.Е. Седельников; заявитель и патентообладатель ООО «Горный ЦОТ» – № 2008139395/22, заявл. 03.10.2008; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4. – 5 с.

27. Пат. № 38 837 Российская Федерация, МПК E21F 5/00 (2001.01) Устройство для измерения запыленности воздушного потока / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов; заявитель и

патентообладатель ООО «ВостЭКО» – № 2003135956/20, заявл. 15.02.2003; опубл. 10.07.2004, Бюл. № 19. – 5 с.

28. Пат. № 2 249 816 Российская Федерация, МПК G01N 31/00 (2000.01) Способ оценки качества профилактической обработки отложений угольной пыли / А.А. Трубицын, С.П. Ворошилов, Н.В. Трубицына, Я.С. Ворошилов; заявитель и патентообладатель ООО «ВостЭКО». – № 2003131514/04, заявл. 27.10.2003; опубл. 10.04.2005, Бюл. № 10. – 4 с.

29. Пат. № 61 347 Российская Федерация, МПК E21F 1/00 (2006.01) Устройство для измерения скорости воздуха в горных выработках / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Я.С. Ворошилов, С.П. Ворошилов, В.Е. Седельников, Д.С. Хлудов, Д.А. Трубицына; заявитель и патентообладатель ООО «ВостЭКО» – № 2006137460/22, заявл. 23.10.2006; опубл. 27.02.2007, Бюл. № 6. – 5 с.

30. Пат. № 72 547 Российская Федерация, МПК G01N 15/02 (2006.01) Устройство для измерения концентрации пыли в шахтной атмосфере / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Д.А. Трубицына, С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов, В.Е. Седельников, А.С. Подображин; заявитель и патентообладатель ООО «ВостЭКО» – № 2007149462/22, заявл. 27.12.2007; опубл. 20.04.2008, Бюл. № 11. – 5 с.

31. Пат. № 37 384 Российская Федерация, МПК E21F 5/00 (2000.01) Устройство для оценки качества осланцевания горных выработок / А.А. Трубицын, С.П. Ворошилов, Н.В. Трубицына, Я.С. Ворошилов, М.С. Попов, С.И. Голоскоков Д.А. Трубицына; заявитель и патентообладатель ООО «Горный ЦОТ» – № 2003134728/20, заявл. 28.11.2003; опубл. 20.04.2004, Бюл. № 11. – 3 с.

32. Пат. № 105 942 Российская Федерация, МПК E21F 7/00 (2006.01) Герметизатор скважин / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Д.А. Трубицына, С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов, А.С. Ворошилов; заявитель и патентообладатель ООО «Горный ЦОТ». – № 2011100244/03, заявл. 11.01.2011; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18. – 4 с.

33. Пат. № 78 865 Российская Федерация, МПК E21F 7/00 (2006.01), G01F 1/20 (2006.01) Устройство для измерения параметров метановоздушной смеси в дегазационном трубопроводе / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Д.А. Трубицына, Я.С. Ворошилов, А.А. Поморцев, А.М. Тимошенко, К.А. Тимошенко, В.Е. Седельников, А.В. Крайнов, С.П. Ворошилов; заявитель и патентообладатель ООО «Горный ЦОТ» – № 2008128058/22, заявл. 09.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34. – 5 с.

34. Пат. № 126 052 Российская Федерация, МПК E21F 17/18 (2006.01) Газоанализатор / С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов, А.С. Ворошилов, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Д.А. Трубицына; заявитель и патентообладатель ООО «Горный ЦОТ» – № 2012126450/03, заявл. 25.06.2012; опубл. 20.03.2013, Бюл. № 8. – 5 с.

35. Пат. № 138 693 Российская Федерация, МПК E21F 5/00 (2006.01) Устройство для оценки качества осланцевания горных выработок /

С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов, В.Е. Седельников, М.С. Попов, А.А. Трубицын, Д.А. Трубицына; заявитель и патентообладатель ООО «Горный ЦОТ» – № 2013145032/03, заявл. 08.10.2013; опубл. 20.03.2014, Бюл. № 8. – 5 с.

36. Пат. № 138 077 Российская Федерация, МПК G01F 1/00 (2006.01) Устройство для измерения параметров метановоздушной смеси в дегазационном трубопроводе / С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов, В.Е. Седельников, А.А. Трубицын, Д.А. Трубицына, А.А. Поморцев, М.К. Дарчук; заявитель и патентообладатель ООО «Горный ЦОТ». – № 2013145035/28, заявл. 08.10.2013; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. – 4 с.

37. Пат. № RU2705732C1 Российская Федерация, МПК E21F 17/18 Многофункциональное программно-информационное устройство / Ворошилов Я.С., Ворошилов С.П.; заявитель и патентообладатель Ворошилов Я.С., Ворошилов С.П. – 2018143059, заявл. 2018.12.06 опубл. 2019.11.11. Бюл. № 32. – 4 с.

38. Пат. № RU190904U1 Российская Федерация, G01B 9/00 Устройство для измерения площадей сечения туннеля / Ворошилов Я.С., Ворошилов С.П. заявитель и патентообладатель Ворошилов Я.С., Ворошилов С.П. – 2018143111, заявл. 2018.12.06, опубл. 2019.07.16. Бюл. № 20. – 5 с.

39. Пат. № RU2648794C2 Российская Федерация, E21F 17/00 Способ управления производственными процессами и устройство для его осуществления / Ворошилов Я.С., Ворошилов С.П. Разумов А.С.; заявитель и патентообладатель Ворошилов Я.С., Ворошилов С.П. – 2016104671, заявл. 2016.02.11, опубл. 2018.03.28, Бюл. № 10. – 2 с.

40. Пат. № RU193342U1 Российская Федерация G02B 23/00, Видеоэндоскоп / Ворошилов Я.С., Ворошилов С.П.; заявитель и патентообладатель Ворошилов Я.С., Ворошилов С.П. – 2018143077, заявл. 2018.12.06, опубл. 2019.10.24, Бюл. № 30. – 4 с.

В прочих изданиях:

41. Ворошилов Я.С. Обзор Состояния условий труда на угольных предприятиях и совершенствование методов определения запыленности воздуха для снижения уровня профессионального риска / Я.С. Ворошилов // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2018: сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции. – Кемерово: КузГТУ, 2018. – С. 106.1–106.2.

42. Ворошилов Я.С. Приборное обеспечение параметров безопасности рудничной атмосферы угольных шахт / Я.С. Ворошилов, А.И. Фомин // XII Международная научная конференция «Инновации в технологиях и образовании», г. Белово, 22–23 марта 2019 г. – г. Белово, 2019. – С. 48–52.

43. Ворошилов Я.С. Современные методы измерения концентрации пыли / Я. С. Ворошилов, А.И. Фомин // Современные методы измерения концентрации пыли: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, г. Междуреченск, 3–4 апреля 2019 г. – г. Междуреченск, 2019. – С. 112-1–122-6.

44. Ворошилов Я.С. Разработка прибора контроля запыленности воздуха горных выработок ПКА-01 / Я. С. Ворошилов, А.И. Фомин // XI Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Россия молодая», г. Кемерово, 16–19 апреля 2019. – г. Кемерово, 2019. – С. 10110.1–10110.4.

45. Макаров П.В. Нелинейная механика геоматериалов и геосред / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Ю.П. Стефанов, П.В. Кузнецов, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов // Рос. акад. наук, Сиб. Отделение, Ин-т физики прочности и материаловедения; ООО «Горный-ЦОТ».- Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. – 235 с.

46. Трубицын А.А. Адаптация методов мезомеханики к исследованию процессов деформирования и разрушения угля: Монография / А.А. Трубицын, П.В. Макаров, О.И. Черепанов, С.П. Ворошилов, Н.В. Трубицына, И.Ю. Смолин, В.В. Соколов, Я.С. Ворошилов, В.В. Киселев, С. Грюнинг.- Кемерово: «Кузбасс-ЦОТ», 2002. – 116 с.

Подписано в печать 29.06.2020
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Объем 2,76 п.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового авторского макета ООО "Лаки Тревел СВЛ"
650002, г. Кемерово, ул. Институтская, д.1, оф. 143, т. (3842) 900-328