

Общество с ограниченной ответственностью
«Кузбасский региональный горный центр охраны труда»
(ООО «Горный ЦОТ»)

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)**

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук
Фомин Анатолий Иосифович

Кемерово – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ ПЫЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ С УЧЕТОМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА	13
1.1. Анализ состояния аварийности, травматизма, профессиональной заболеваемости работников угольных шахт России и Кузбасса	13
1.2. Теоретические исследования разрушения угля. Общие положения	26
1.3. Контроль отложившейся и витающей пыли в горных выработках	38
1.4. Обоснование роли влияния человеческого фактора на аварийность, травматизм, профессиональную заболеваемость работников угольных шахт	47
Выводы по главе	73
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ	74
2.1. Общие положения	74
2.2. Изучение объемной структуры каменных углей с использованием рентгеновской томографии	120
Выводы по главе	142
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ НЕПОСРЕДСТВЕННО В ТОЧКЕ ОТБОРА ПРОБЫ	143
Выводы по главе	187
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВИТАЮЩЕЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ВОЗДУХЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НЕПОСРЕДСТВЕННО В ТОЧКЕ ИЗМЕРЕНИЯ	188
4.1. Разработка экспериментальной установки	197
4.2. Техническое устройство для реализации методики измерения концентрации пылевого аэрозоля	220
Выводы по главе	223
ГЛАВА 5. Разработка методики измерения массовой концентрации витающей угольной пыли в воздухе рабочей зоны в непрерывном режиме	224
5.1. Обзор методик к организации непрерывного контроля витающей угольной пыли	224
5.2. Разработка экспериментальной установки	236
Выводы по главе	249
ГЛАВА 6. Разработка концептуальной модели человеческого фактора и электронных средств поддержки, управления человеческим фактором в условиях работы на угольных шахтах, опасных по взрывам метана и угольной пыли	250
6.1. Построение концептуальной многоуровневой модели компетентности (комплекса способностей) работников в сфере охраны труда	250
6.2. Построение концептуальной модели человеческого фактора	262
6.3. Разработка концептуальной модели персональной системы управления человеческим фактором	269
Выводы по главе	278
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	279
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	282

ВВЕДЕНИЕ

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 мощным 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 угол 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 томографических 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 г.

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 46 печатных работах, в их числе в изданиях, входящих в Перечень российских рецензируемых журналов ВАК, – 24; в прочих изданиях – 6; 15 патентов на изобретения и полезные модели.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, изложенных на 308 страницах, содержит 86 рисунков, 36 таблиц, список литературы из 265 наименований.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ ПЫЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ С УЧЕТОМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

1.1. Анализ состояния аварийности, травматизма, профессиональной заболеваемости работников угольных шахт России и Кузбасса

Российская Федерация является одним из основных мировых лидеров по добыче угля, занимая шестое место по объемам добычи угля после Китая, США, Индии, Австралии и Индонезии.

Фонд действующих угледобывающих предприятий России в 2018 года составил 330 предприятий (95 шахт, 279 разрезов). Переработка угля осуществляется на 86 обогатительных фабриках и установках, а также на сортировках, имеющихся в составе большинства угольных компаний [1].

В пределах России находятся 22 угольных бассейна и 129 месторождений. На предприятиях угольной отрасли трудятся около 144 тысяч человек [1].

За 2018 год добыча угля в России доведена до 439,3 млн. тонн. Объем добычи по сравнению с 2017 годом возрос на 28,1 млн. тонн (7 %).

Объем экспорта российского угля в 2018 году составил 193,2 млн. тонн, по сравнению с 2017 годом он увеличился на 6,9 млн. тонн (4 %). По сравнению с 2012 годом объем экспорта угля увеличен на 62,8 млн. тонн (2012 г. – 130,4 млн. тонн) [1].

Из угледобывающих регионов страны самым мощным поставщиком угля является Кузнецкий бассейн – здесь добывается более половины (58 %) всего добываемого угля в стране и 75 % углей коксующихся марок.

На территории Кемеровской области добычу угля в 2018 году осуществляли 42 предприятия с подземным способом добычи (2 шахты – в стадии строительства, 22 – в стадии ликвидации и консервации),

51 предприятие с открытым способом добычи и 54 предприятия по переработке и обогащению угля [2].

Всем предприятиям с подземным способом добычи угля в 2018 году установлена категоричность по вредным газам. По метану: опасные по внезапным выбросам угля и газа (ОВВ) – 11 шахт; сверхкатегорийные (Св. кат.) – 17 шахт; третья категория (III) – 5 шахт; вторая категория (II) – 4 шахты; первая категория (I) – 5 шахт. По диоксиду углерода: 20 шахт отнесены к первой категории, 5 – ко второй категории, 1 – к третьей и 16 шахт отнесены к категории не опасных [2].

Основной вклад в увеличение объемов добычи угля в Кузбассе вносят АО «СУЭК-Кузбасс», АО «УК «Кузбассразрезуголь», АО ХК «СДС-Уголь», ООО «ЕвразХолдинг», ЗАО «Стройсервис», ОАО «УК «ЕВРАЗ Междуреченск», ПАО «Кузбасская Топливная Компания», ПАО «Южный Кузбасс».

По сравнению с 2017 годом в 2018 году общий травматизм снижен на 9 случаев, а травматизм со смертельным исходом – на три случая. На предприятиях угольной отрасли Кузбасса в 2018 году травмировано 118 человек, из них 8 человек – смертельно. Если сравнивать с 1992 годом, то число травмированных в угольной отрасли в 2018 году уменьшилось в 75 раз (1992 год – 8 872 чел. получили травмы на производстве).

Это, прежде всего, связано с принятием мер по улучшению условий труда на рабочих местах, внедрением передовой современной горной техники, средств автоматизации и контроля состояния аэрогазовой обстановки в горных выработках, многофункциональных систем безопасности, совершенствованием системы управления охраной труда и промышленной безопасностью угольных компаний.

Уровень аварийности по сравнению с 2017 годом увеличен на 2 аварии. В 2018 году произошло 4 аварии: 07.04.2018 г., Шахта им. В.И. Ленина ПАО «Южный Кузбасс» – эндогенный пожар; 13.05.2018 г., ООО «Шахта Грамотеинская» ООО «Западно-Сибирская угольная компания» – эндогенный

пожар; 14.08.2018 г., АО «ШУ «Талдинское-Южное» ООО «УК «Талдинская») – эндогенный пожар; 09.12.2018 г., Шахта «Первомайская» АО «УК «Северный Кузбасс» – эндогенный пожар. За 2017 год было допущено 2 аварии [2].

В результате принятия комплекса предупредительных мер показатель травматизма со смертельным исходом при добыче 1 млн. тонн угля снизился до 0,03 (т. е. 1 человек на 31,9 млн. тонн). В 1992 году этот показатель был равен 1,2 (1 человек на 0,9 млн. тонн) [2].

При приемке в эксплуатацию очистных участков требуется обязательное оснащение выработок и оборудования всеми необходимыми средствами системы безопасности.

В период с 2012 по 2018 год продолжалась работа по оснащению шахт многофункциональными системами безопасности (МФСБ) и созданию автоматизированных систем мониторинга.

На 23 из 42 действующих шахт введены системы геофизических и сейсмических наблюдений.

Элементы системы обнаружения ранних признаков эндогенных и экзогенных пожаров и локализации экзогенных пожаров имеются практически на всех шахтах, но в целом системы имеются на 38 шахтах (88 %). На остальных шахтах не реализована функция по выводу информации диспетчеру шахты со всех установок автоматического пожаротушения об их срабатывании. Реализация всех требований по противопожарной защите запланирована на 2019 год [2].

В крупных угольных компаниях – ОАО «СУЭК-Кузбасс», АО «Распадская угольная компания», ЗАО ХК «СДС-Уголь» созданы единые диспетчерско-аналитические центры, оснащенные средствами централизованного контроля за состоянием безопасности в шахтах.

АО «НЦ ВостНИИ» разработана концепция развития МФСБ на подземных угольных шахтах и система дистанционного мониторинга

состояния промышленной безопасности объектов повышенной опасности в угольной отрасли.

Таблица 1.1 – Динамика добычи угля и травматизма на предприятиях угольной отрасли Кузбасса в 2012–2018 гг.

Годы	Добыча угля Кузбасс (млн. тонн)	Добыча угля РФ (млн. тонн)	Общий травматизм уголь Кузбасс (чел.)	Уголь Россия/Кузбасс травматизм со смертельным исходом (чел.)	Кол-во смертельных случаев на 1 млн. т. добычи в Кузбассе
2012	201,5/78,9/ 122,6	354,6/ 105,7/ 248,9	394	36/28	0,14
2013	203,0/76,9/ 126,1	352,1/101,3/ 250,8	294	63/38	0,19
2014	210,8/79,8/ 131,0	358,2/105,3/ 252,9	222	26/26	0,12
2015	215,8/76,3/ 139,5	374,0/ 103,6/ 270,4	188	20/16	0,07
2016	227,4/82,3/ 145,1	386,9/ 104,3/282,6	175	56/13	0,057
2017	241,5/ 84,9/156,6	408,9/ 105,4/303,5	127	11	0,046
2018	255,3/89,5/ 165,8	439,3/108,3/331,0	118	8	0.031

Таким образом, совершенствование системы управления охраной труда и промышленной безопасностью позволяет решать проблему энергетической безопасности страны, наращивая ежегодно объемы добычи угля, и одновременно важнейшую социальную задачу – снижать уровень общего и смертельного травматизма.

1.1.1. Деятельность федеральных органов надзора и контроля за исполнением трудового законодательства

Прокуратура

В 2018 году Кемеровской межрайонной прокуратурой по надзору за исполнением законов в угледобывающей отрасли проведены проверки

исполнения законодательства об охране труда и промышленной безопасности на 129 угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях. По их результатам выявлено 1769 нарушений законодательства, в связи с чем руководителям угледобывающих предприятий и компаний внесено 128 представлений, по результатам которых приняты меры к устранению нарушений, 1014 должностных лиц привлечены к дисциплинарной ответственности.

На основании вынесенных прокурором постановлений к административной ответственности привлечено 1268 виновных лиц, общая сумма наложенных штрафов составила свыше 32 млн. рублей, семь должностных лиц дисквалифицированы. В суды направлено 6 исковых заявлений.

Распространенными нарушениями требований промышленной безопасности, выявляемыми прокуратурой на угольных предприятиях области, среди прочих являются: эксплуатация неуполномоченных средств измерения; неознакомление работников с планами ликвидации аварий; несвоевременное проведение первичных, вводных и повторных инструктажей по охране труда работникам предприятия; нарушение режимов труда и отдыха; несвоевременная выдача и невыдача работникам средств индивидуальной защиты (СИЗ); нарушение требований пожарной безопасности на предприятиях.

Результатом надзорной деятельности прокуратуры стало обеспечение работников СИЗ, соблюдение режима труда и отдыха горняков, проведение экспертиз промышленной безопасности, устранение нарушений и планов развития горных работ и др. Всего за 2018 год прокуратурой защищены права 18 566 работников предприятий угольной отрасли Кузбасса.

Надзорная деятельность, осуществляемая Кемеровской межрайонной прокуратурой, способствует снижению аварийности и производственного травматизма на предприятиях угольной отрасли региона [3].

Понуждение прокурором к устранению выявленных нарушений закона руководителей угледобывающих предприятий способствовало восстановлению и защите прав семи тысяч трудящихся, в том числе обеспечению работников средствами индивидуальной защиты, соблюдению режима труда и отдыха горняков, проведению экспертиз промышленной безопасности, установлению в производственных зданиях шахт и разрезов систем автоматической пожарной сигнализации, устранению иных нарушений закона [4].

Государственная инспекция труда в Кемеровской области

Государственный надзор и контроль за соблюдением законодательства и иных нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права, осуществляет Государственная инспекция труда в Кемеровской области – территориальный орган Федеральной службы по труду и занятости путем проведения плановых и внеплановых проверок, составления протоколов, выдачи предписаний об устранении выявленных нарушений требований законодательства по охране труда.

В таблице 1.2. приведены Результаты контрольно-надзорной деятельности государственной инспекции труда в Кемеровской области за 2013-2018 годы.

Таблица 1.2 – Результаты контрольно-надзорной деятельности государственной инспекции труда в Кемеровской области

Показатель	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Проведено проверок организаций, ед.	5726	5464	5597	5098	3781	3320
Выявлено нарушений требований ТК РФ, ед.	19213	15132	13768	16106	21796	13053
Привлечено к административной	3760	3972	4084	5680	6121	5041

Показатель	2013	2014	2015	2016	2017	2018
ответственности, чел.						
Сумма наложенных штрафов, тыс. руб.	34030,0	61783,8	128123,1	121595,0	110866,4	91912,5

Государственные инспекторы труда приняли участие в расследовании 252 несчастных случаев на производстве (на 26 случаев меньше, чем в 2017 году), включая 83 случая, не связанных с производством (из них 76 – со смертельным исходом) и выявлено 695 нарушений порядка расследований.

По результатам расследования несчастных случаев в 2018 году работодателям выдано 209 предписаний на устранение выявленных в ходе расследования 1 585 нарушений требований правил и норм по охране труда.

Административные наказания в виде штрафов наложены на 447 ответственных работников и юридических лиц на общую сумму 13 883,3 тыс. рублей (2017 г. – 21 892 тыс. руб.). В следственные органы направлены материалы расследований по 252 фактам несчастных случаев на производстве. По состоянию на 1 января 2019 года в соответствии со ст. 143 УК РФ возбуждено и находится в производстве 15 уголовных дел. К уголовной ответственности виновные лица в 2018 году не привлекались [5].

Территориальные подразделения Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору

Сибирскому управлению Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) на территории Кемеровской области поднадзорны 788 организаций, зарегистрировано в реестре опасных производственных объектов – 2 035, в т. ч. в угольной отрасли – 410.

В 2018 году проведено 7 427 проверок, в т. ч. 195 – плановых, 583 – внеплановых, в рамках режима постоянного государственного надзора – 6 649 проверок.

В ходе проверок выявлено 54 620 нарушений требований промышленной безопасности. Применено 8 610 административных наказаний, в т. ч. 7 881 административный штраф (2017 г. – 7 777) на общую сумму 293 млн. рублей (2017 г. – 298,5 млн. руб.), административных приостановок – 640 (2017 г. – 635), дисквалификаций – 8 должностных лиц, предупреждений – 81. Общая сумма взысканий штрафов составила более 227 млн. рублей.

В 2018 году на предприятиях, поднадзорных Сибирскому управлению Ростехнадзора на территории Кемеровской области, в результате несчастных случаев пострадало 139 человек (2017 г. – 143 человека), из них 12 – смертельно (2017 г. – 15 человек), на предприятиях угольной промышленности произошло 118 случаев причинения вреда жизни и здоровью граждан (2017 г. – 127), в т. ч. 8 несчастных случаев со смертельным исходом. Из 8 смертельных несчастных случаев, допущенных на предприятиях угольной отрасли, 7 произошли на предприятиях, ведущих добычу угля подземным способом (2017 г. – 11), и один – на открытых горных работах (2017 г. – 0).

За 2018 год на предприятиях, поднадзорных Сибирскому управлению Ростехнадзора на территории Кемеровской области, допущено 5 аварий: 4 – в угольной отрасли и 1 на объекте химической промышленности. Пострадал в аварии 1 человек. В угольной промышленности аварии произошли:

07.04.2018 г. – эндогенный пожар в филиале ПАО «Южный Кузбасс», Управление по подземной добыче угля – шахта им. В.И. Ленина;

13.05.2018 г. – эндогенный пожар в ООО «Шахта «Грамотеинская»;

14.08.2018 г. – эндогенный пожар в АО «Шахтоуправление «Талдинское-Южное»;

09.12.2018 г. – пожар в АО «УК «Северный Кузбасс» шахта «Первомайская».

Основные причины допущенных несчастных случаев: несоблюдение требований промышленной безопасности, ведение работ опасными методами.

Анализ материалов по расследованию показывает низкий уровень подготовки специалистов по вопросам промышленной безопасности при эксплуатации ОПО.

Специалистами горного надзора на предприятиях угольной промышленности в 2018 году проведено 6 475 проверок (2017 г. – 6 068), в т. ч. 51 – плановая, 100 внеплановых, в рамках режима постоянного государственного контроля на ОПО проведено 6 324 обследования (2017 г. – 5 873). Выявлено и предписано к устранению 47 513 нарушений (2017 г. – 46 647) требований законодательства в области промышленной безопасности. [2].

Результаты деятельности Прокуратуры, Трудовой инспекции и Ростехнадзора наглядно показывают, что основная масса нарушений требований законодательства по охране труда и промышленной безопасности обусловлена человеческим фактором – некомпетентными действиями работодателей и их представителей в сфере безопасности труда.

1.1.2. Территориальные подразделения Федеральной службы в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

По информации Управления Роспотребнадзора по Кемеровской области, в 2018 году обследовано с применением лабораторных и инструментальных методов исследования 1 302 объекта, при этом проведено 27 181 обследование воздушной среды воздуха закрытых помещений и воздуха рабочей зоны на пары и газы и 9 491 исследование на пыль и аэрозоли [6].

При осуществлении в 2018 году федерального государственного санитарно-эпидемиологического надзора за условиями труда обследовано 238 промышленных объектов (2017 г. – 283), в рамках плановых проверок обследовано 112 объектов, в рамках внеплановых проверок – 150 объектов [6].

Нарушения требований санитарного законодательства выявлены в ходе 165 обследований объектов, что составило 69,3 % от общего числа проведенных обследований. Выявлено 747 правонарушений, подпадающих под действие норм федерального закона от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

По фактам выявленных нарушений составлено 650 протоколов об административном правонарушении, в т. ч. по результатам административных расследований составлено 76 протоколов [6]. Эти нарушения, прежде всего, вызваны человеческим фактором. Непринятие мер со стороны надзорных и контрольных органов привели бы к росту числа аварий, инцидентов, травмированных работников и работников, получивших общие и профессиональные заболевания.

Таблица 1.3 – Меры административного воздействия по итогам проведения мероприятий по надзору за условиями труда в 2014–2018 гг.

Год	Число составленных протоколов	Вынесено постановлений о назначении штрафа	Из них на юридических лиц	Принято решений о приостановлении деятельности
2014	872	839	250	27
2015	597	478	118	40
2016	886	769	211	54
2017	795	673	220	48
2018	650	715	185	25

Таблица 1.4 – Показатели состояния условий и охраны труда в Кемеровской области за период 2014–2018 гг.

Показатель	2014	2015	2016	2017	2018
Численность пострадавших на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий	1329	1328	1217	1172	1011

Показатель	2014	2015	2016	2017	2018
день и более и со смертельным исходом, тыс. чел.					
На 1 тыс. работающих	2,7	2,7	2,6	2,7	2,3
Численность пострадавших при несчастных случаях на производстве со смертельным исходом	74	50	34	47	37
На 1 тыс. работающих	0,121	0,105	0,056	0,089	0,069
Заняты на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, тыс. чел.	217,3	216,7	207,6	207,9	204,8
От списочной численности обследованных организаций, %	66,8	67,7	67,3	67,7	67,1
Зарегистрировано профессиональными заболеваниями больных	1095	1053	1025	821	733
Уровень профессиональной заболеваемости (количество случаев на 10 тыс. занятого населения по всем предприятиям)	13,00	13,32	13,23	10,93	9,96
Обучено охране труда, чел.	33349	33240	33759	35370	39753
Израсходовано на мероприятия по охране труда за год, млрд. руб.	6,8	6,4	6,1	6,8	7,6
Израсходовано на мероприятия по охране труда на одного работающего, тыс. руб.	13,8	13,2	13,1	15,6	17,6
Провели специальную оценку условий труда, ед.	266	2841	1996	2118	2807
Количество рабочих мест, на которых проведена специальная оценка условий труда, тыс. чел.	7,5	77,2	74,9	66,9	129,8
Численность работающих на рабочих местах, прошедших специальную оценку условий труда, тыс. чел.	11,6	144,0	144,7	104,6	119,5
Всего проведено государственных экспертиз условий труда	143	153	241	315	300
В т. ч. проведено государственных экспертиз по определению судов	143	149	235	249	382

Таблица 1.5 – Сведения о числе лиц с впервые установленными профессиональными заболеваниями (отравлениями) за 2016–2018 гг.

Субъект РФ	2016 г.		2017 г.		2018 г.	
	всего	в т. ч. женщин	всего	в т. ч. женщин	всего	в т. ч. женщин
Кемеровская область	1025	46	821	41	733	32
Российская Федерация	5520	711	4756	625	4147	508

Показатель профессиональной заболеваемости в Кемеровской области на 10 тысяч занятого населения в 2018 году составил 9,96 (2017 г. – 10,93), что превышает аналогичный показатель по Российской Федерации в 8,5 раза, и связано с высокой распространенностью профессиональных заболеваний на предприятиях угольной промышленности [6].

Показатель профессиональной заболеваемости в угольной отрасли Кузбасса на 10 тысяч занятого населения в 2018 году составил 66,93 случая (2016 г. – 96,10; 2017 г. – 67,16).

В 2018 году на предприятиях по добыче угля зарегистрировано 597 случаев профессиональных заболеваний (75,95 %) [6].

В угольной отрасли в зависимости от действующего фактора наиболее высокий уровень профессиональной заболеваемости 50,41 % отмечается от воздействия физических факторов, на втором месте заболевания, вызванные воздействием физических перегрузок, – 38,53 %.

Таблица 1.6 – Структура профессиональной патологии в угольной отрасли Кемеровской области в 2016–2018 гг.

Производственный фактор	Число заболеваний			Удельный вес, %		
	2016 год	2017 год	2018 год	2016 год	2017 год	2018 год
Физические перегрузки	361	269	230	43,28	40,03	38,53
Физические факторы, в том числе:	375	311	301	44,97	46,27	50,41

Производственный фактор	Число заболеваний			Удельный вес, %		
	2016 год	2017 год	2018 год	2016 год	2017 год	2018 год
Шум	176	160	146	21,1	23,80	24,45
Вибрация	199	151	155	23,87	22,47	25,96
Промышленные аэрозоли	97	92	66	11,63	13,70	11,06
Химический фактор	1	0	0	0,12	0	0
Всего по Кемеровской области	834	672	597	100	100	100

В структуре профессиональной патологии на угледобывающих предприятиях Кузбасса преобладающее воздействие оказывают такие вредные производственные факторы, как шум, общая и локальная вибрация, угольная и породная пыль. Нарушение пылегазового режима в шахте приводит к авариям с большим количеством человеческих жертв и росту профессиональных заболеваний шахтеров пылевой этиологии.

В наибольшей мере подвержены профессиональным заболеваниям работники основных профессий предприятий по добыче угля.

На шахтах в профессии «проходчик» зарегистрировано 136 заболеваний, «машинист горных выемочных машин» – 59, «горнорабочий очистного забоя» – 74, «электрослесарь подземный» – 82, «горнорабочий подземный» – 22, «горномонтажник подземный» – 18.

На угольных разрезах зарегистрировано: у машинистов экскаватора – 41 заболевание, у водителей, занятых на транспортировании горной массы в технологическом процессе, – 42 заболевания, у машинистов бульдозера – 12, у машинистов буровой установки – 8.

По данным Росстата России удельный вес работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда на предприятиях угольной промышленности на конец 2019 года, составил: воздействие аэрозолей преимущественно фиброгенного действия – 37,8 %, шума – 47,1 %,

общей и локальной вибрации – 23,3 %. Кроме того, физические перегрузки при наличии на рабочих местах аэрозолей, преимущественно фиброгенного действия (АПФД) приводят к увеличению пылевой нагрузки на работников шахт, росту профессиональной заболеваемости органов дыхания. Как видно из этой статистики, контроль пылевой обстановки в горных выработках имеет важнейшее значение в охране труда шахтеров.

Анализируя состояние аварийности, травматизма, профессиональной заболеваемости работников угольных шахт, можно отметить 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 профзаболеваний, вызванных воздействием угольной пыли на организм шахтеров, так 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 катастроф и аварий 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.

1.2. Теоретические исследования разрушения угля. Общие положения

Механическое поведение твердых тел под нагрузкой включает в себя два взаимосвязанных процесса – деформацию и разрушение нагружаемой среды. Огромный накопленный экспериментальный материал и микроструктурные исследования убеждают, что разрушение – это, прежде всего, локальный процесс и завершающая стадия деформационного процесса. Разрушение наступает тогда, когда в данной локальной области материал исчерпывает возможности диссипировать подводимую энергию за счет деформационных

процессов (упругих, вязкоупругих, пластических, фазовых превращений и т. д.) и остается единственным способом диссипации – разрыв атомных связей, т. е. разрушение материала. Масштаб такого разрушения определяется многими факторами, в том числе условиями нагружения и структурной организацией материала.

Несмотря на то, что определенная общность физической природы и взаимосвязь процессов деформации и разрушения признается большинством исследователей, теории пластичности и разрушения твердых тел остаются, по сути, разными науками и развиваются если не независимо, то параллельно. Макроскопическая феноменологическая теория не способна снять подобное противоречие. Особенно ярко это проявляется при рассмотрении поведения под нагрузкой сложных гетерогенных сред, к которым относится и уголь. Для подобных сред одни структурные элементы представительной макрочастицы оказываются деформированными упруго, другие претерпевают глубокие пластические деформации, третьи оказываются разрушенными.

На наш взгляд, задача объединения процессов деформации и разрушения в рамках общей концепции может быть успешно решена с позиций подхода физической мезомеханики [8–12], в рамках которого на каждом масштабном микро-, мезо- и макроуровне задача локального разрушения может решаться в соответствии со специфическими механизмами предваряющей разрушение неупругой деформации.

Согласно представлениям авторов [13], к настоящему времени сложилась и развивается единая картина мира нагруженных и разрушаемых тел на основе установленных общих физических закономерностей, которые справедливы для любых материалов, в том числе и для горных пород. Уголь традиционно относят к горным породам, представляющим собой сложную многокомпонентную структуру органического происхождения [14]. Следуя представлениям работы [13], которым в значительной степени присуще рассматривать разрушение как изолированный от предваряющей неупругой деформации процесс, можно выделить три характерных периода в развитии

науки о разрушении, которая эволюционировала от простейших, сугубо феноменологических представлений о предельных состояниях разрушаемых сред, до атомно-кинетических представлений, становления термофлуктуационной концепции (микроуровень), установления концентрационного критерия укрупнения трещин (выход на макроуровень) и идей иерархичности процесса разрушения:

1) разрушение рассматривается исключительно феноменологически, как предельное состояние структурно-однородной среды, и наступает, когда напряжения достигают определенного значения – предела прочности материала, претендующего на роль материальной константы;

2) как и в физике пластичности, в разрушаемый материал вводятся исходные «дефекты» – трещины, которые выступают как концентраторы напряжений и способны повысить незначительные средние напряжения вплоть до величин теоретической прочности. В рассмотрение вводятся коэффициенты интенсивности напряжений;

3) становление кинетической теории прочности твердых тел на основе термофлуктуационной концепции. Развитие теории повреждаемости и установление концентрационного критерия укрупнения трещин. Развитие иерархических моделей разрушения материалов.

Какой бы подход ни использовался, в расчетах для принятия решения о переходе материала в разрушенное состояние необходимо знание локального критерия разрушения. Это фундаментальное понятие принципиально изменяется при изменении концепции разрушения в рамках изложенных трех периодов в науке о разрушении.

Теория предельных состояний (предельное напряжение, либо предельная деформация) первоначально была разработана для металлов и нашла широкое применение, прежде всего, в инженерных расчетах конструкций на прочность. Перенос этой концепции на горные породы оказался неутешительным. Если для металлов прогноз разрушения с инженерной точки зрения выглядел более или менее приемлемым в силу заметной

предварительной пластической деформации и хорошей экспериментальной изученностью σ – ϵ диаграмм, а также сравнительно незначительной вариацией предельных значений напряжений и деформаций, то для хрупких материалов и для горных пород, к которым относится и уголь, существенная неопределенность возникновения как момента, так и места разрушения приводит к практической неприемлемости такого подхода для какого-либо предсказания разрушения хрупких сред, начиная от лабораторных образцов и заканчивая разрушением элементов земной коры. Особенно ярко специфика этой концепции проявляется при ее применении к «однородным» средам, например, к стеклам, для которых, казалось, она должна бы сработать, но не срабатывает. Точность предсказания разрушения оказывается слишком низкой. Авторы работ [15, 16], анализируя эту ситуацию, просто констатируют, что прочность хрупких образцов, взятых для одного и того же материала (даже сравнительно однородных стекол), варьируются в пределах 15–30 %. Вариации же по времени разрушения при, например, линейном наращивании напряжений, уже достигает 100–200 % и более. В этом смысле разрушение всегда наступает внезапно. Отметим, что рассматривается макрообразец. Масштабный фактор вообще отсутствует, и микроскопический объект, и объект протяженностью в сотни или даже тысячи километров ведут себя одинаково. Такой объект под нагрузкой может находиться в двух дискретных состояниях: неразрушенном либо разрушенном. После снятия нагрузки он возвращается в исходное состояние. Материал, нагруженный ниже предела прочности, разрушить в принципе невозможно. Однако в ходе любого нагружения неизбежно возникает кластеризация внутренней микроструктуры материала, которая делает его неоднородным, перераспределяя поля напряжений. С другой стороны, известно, что пластическая (в более общем случае – неупругая) деформация всегда предшествует разрушению, в том числе и для хрупких материалов и горных пород, только она локализована в малых областях высоких концентраций напряжений – в вершине «хрупкой» трещины при средних по макрообразцу

напряжениях, далеких от предела прочности. Это объясняет значительно большую вариацию времени разрушения, которая определяется существенно нелинейными локальными процессами кластеризации и развития неупругих деформаций в областях концентрации напряжений (т. е. на более низком масштабном уровне – микроуровне, который в теории предельных состояний не принимается во внимание).

Реальные горные породы, в том числе уголь, являются сложными многокомпонентными системами. Их макроскопическое разрушение будет определяться не только средними по макрочастицам напряжениями и деформациями, но и локальными свойствами структурных элементов, их взаимодействиями друг с другом и особенностями поведения под нагрузкой интерфейсов. Понятно, что вариации по месту и времени их макроскопического разрушения оказываются существенно большими по сравнению с относительно однородными стеклами.

Здесь следует заметить, что время разрушения в рамках концепции предельного состояния вообще отсутствует. О нем можно косвенно судить только в случаях, когда напряжения либо деформации наращиваются пропорционально времени [15,16]. Таким образом, проблема прогноза времени разрушения в рамках этой концепции принципиально не может быть поставлена.

Вторая концепция нашла наибольшее применение в инженерной практике в силу своей относительной простоты и сведения проблемы разрушения материала к решению упругой задачи о напряженно-деформированном состоянии. В упрощенном изложении эта концепция выглядит следующим образом. Трещины рассматриваются как концентраторы напряжений. Область с трещиной, в которой возникают неупругие деформации, исключается из рассмотрения. Эта область вокруг носика трещины определяется экспериментально и вводится в теорию через коэффициенты интенсивности напряжений, которые приобретают смысл материальных констант, характеризующих разрушение данного материала и,

добавим от себя, выбранный масштаб разрушения. В настоящей работе эта концепция в дальнейшем непосредственно рассматриваться не будет, так как она ориентирована на рассмотрение единичной трещины и не предполагает привлечения физических представлений, а носит сугубо инженерный характер.

Термофлуктуационная концепция исходит из фундаментальных физических представлений [15], когда разрыв связей между атомами осуществляется флуктуациями их теплового движения, и рассматривает разрушение как кинетический процесс накопления повреждений. В теорию вводится удобная для регистрации характеристика поврежденности. Предполагается, что механизмом разрушения твердых тел (всех без исключения: пластических и хрупких, металлов и сплавов, композитов и горных пород, полимеров при различных условиях нагружения: сжатие, растяжение, изгиб, сложное нагружение) является зарождение множества хаотически расположенных стабильных микротрещин. Вводится мера поврежденности среды, которой является среднее расстояние между трещинами, измеренное в единицах их среднего размера. Эта безразмерная величина M рассматривается как физическая мера поврежденности. При $M=e$ (e – основание натурального логарифма) образуется более крупная трещина, т. е. разрушение переводится на следующий (более высокий) масштабный уровень. Условие $M = e$ принято называть концентрационным критерием укрупнения трещин [15]. Авторы работы [15] рассматривают процесс формирования укрупненных трещин как возникновение новой стадии структурной самоорганизации разрушаемого твердого тела, находящегося в неравновесном состоянии под действием приложенных нагрузок.

Работоспособность концентрационного критерия изучена не только для широкого круга материалов, но и проверена в чрезвычайно широком диапазоне линейных размеров трещин ($\cong 12$ порядков, от 100\AA до $\cong 10$ км) при вариации концентраций трещин приблизительно на 35 порядков.

Установлено, что во всех случаях относительное среднее расстояние между трещинами на момент разрушения всегда было близко к трем ($e = 2,718$).

Однако заметим, что соответствующие эксперименты оказываются весьма сложными (необходимо определить средний размер трещин и их концентрацию), концентрационный критерий кластеризации (или укрупнения трещин) устанавливается эмпирически после разрушения образца соответствующего масштаба с набором сходных (близких по размеру) трещин. Замечено также, что экспериментально наблюдаемое разрушение макроскопических образцов довольно часто не соответствует концентрационному критерию. Это, на наш взгляд, связано с тем, что теория пытается сразу перейти от микроуровня (первичных термофлуктуационных трещин) к макроуровню и упускает из вида промежуточный масштабный уровень – мезоскопический и реальные структурные неоднородности материала как на микромасштабном уровне, так и на уровне мезоскопического масштаба.

Привлекательность концентрационного критерия кластеризации заключается в его универсальности и нечувствительности к масштабу разрушения, что позволяет для выбранного масштаба разрушения построить для конкретного материала соответствующую кинетику накопления повреждений (трещин близких размеров) и по соответствующим экспериментам определить критические значения поврежденности. Обычно пользуются величиной поврежденности, нормированной к единице. Поврежденность среды, меньшая единицы, позволяет оценить ее остаточный ресурс.

В настоящей работе критерий накопления повреждений будет использован как микроскопический уровень решения задачи о разрушении среды для принятия решения о локальном разрушении материала на более высоком (мезоскопическом) масштабном уровне.

Универсальность и нечувствительность концентрационного критерия укрупнения трещин к масштабу разрушения открыли путь для развития

иерархических моделей разрушения. Фактически концентрационный критерий разрушения устанавливает количественное подобие ($M = e$) процесса разрушения независимо от его масштаба. Это прямой аналог принципа масштабной инвариантности В.Е. Панина [15–16], сформулированного им для пластически деформируемых сред.

Эти принципы масштабной инвариантности процессов пластической деформации и разрушения ни в коей мере не отрицают определяющей роли соответствующих специфических кинетик зарождения пластических сдвигов либо накопления «повреждений» (трещин соответствующего масштаба) на соответствующем масштабном уровне.

В рамках термофлуктуационной концепции и концентрационного критерия кластеризации подъем по иерархической лестнице сопровождается только количественными, но не качественными изменениями, как отмечают авторы [15]. Строится последовательность иерархически связанных кинетических уравнений, в которых переход с одного уровня на другой всегда осуществляется при выполнении условия $M=e$ в однородной бесструктурной среде, стартуя от первичных термофлуктуационных микротрещин.

Переход к иерархическим моделям разрушения, на наш взгляд, является очень серьезным достижением в развитии концепции накопления повреждений и кластеризации, ее вершиной. Следующий шаг в развитии науки о разрушении материалов связан со становлением физической мезомеханики [15-17], которая перешла от бесструктурной среды к средам структурно-неоднородным на каждом масштабном уровне, сохранив весь золотой фонд, накопленный на предыдущих этапах.

Если ключевую роль мезоскопического масштабного уровня в развитии процессов неупругой деформации материалов можно считать доказанной, как теоретически, так и экспериментально [15–17], то это же можно сказать и о разрушении как заключительной стадии деформирования. Мезоуровень – ведущий структурный уровень в развитии разрушения твердых тел.

Интересно отметить, что сходные ситуации сложились как в физике пластичности, так и при изучении деформации и разрушения угля. Как и в физике пластичности «попытки связать разработанные модели молекулярного строения (микроуровень) с физическими свойствами углей (макроуровень) предпринимались различными авторами, однако их нельзя признать успешными» – пишут авторы работы [17]. Причина неуспеха в объяснении физики разрушения макрообъекта непосредственно через микроскопическое строение видится авторами работы [17] в том, что не была принята во внимание надмолекулярная организация (НМО) угля, который в этом случае рассматривается как полимер. Фактически это утверждение означает необходимость ввести в рассмотрение промежуточный уровень структурной организации материала.

Рассмотрим масштабные уровни и критерии разрушения.

Одним из основных положений физической мезомеханики материалов является концепция последовательной потери локальной сдвиговой устойчивости материалов на разных масштабных уровнях [17]: микро-, мезо- и макро-. В рамках этой концепции разрушение на каждом масштабном уровне будет завершающей стадией предварительной нелинейной, неупругой реакции материала на нагружение в локальных областях концентраторов напряжений, когда аккомодационные способности материала к нагружению за счет неупругой реакции в этой локальной области оказываются исчерпанными и дальнейшая аккомодация и релаксация напряжений может осуществляться только за счет раскрытия трещин соответствующего масштаба.

На микромасштабном уровне атомной организации материала будут зарождаться первичные микротрещины (микрповреждения), как это описывается феноменологически в рамках термофлуктуационной концепции.

Переход разрушения на более высокий структурный уровень (мезоуровень) связан с потерей сдвиговой устойчивости материалом на этом уровне в локальных областях мезообъемов и накоплением неупругих деформаций и повреждений в этих областях, т. е. в полосах локализованной

деформации. Таким образом, термофлуктуационная концепция и концентрационный критерий кластеризации хорошо вписываются в концепцию физической мезомеханики материалов, занимая в данном случае микроскопический уровень зарождения микроповреждений и микротрещин, и выливаются в большое разнообразие специфических кинетик накопления микроповреждений для различных материалов и масштабов явлений разрушения. Так, переход от мезомасштабного уровня к макроуровню связан с необходимостью построения адекватной кинетики накопления мезотрещин соответствующего пространственного масштаба.

В отличие от идеального концентрационного критерия кластеризации, не чувствительного к масштабу разрушения, явный учет значимых структурных элементов и их неупругих деформаций, их взаимодействий, особенностей интерфейсов – внутренних границ между структурными элементами, должен найти отражение в соответствующей кинетике накопления трещин данного масштаба. Условие же $M = e$, по-видимому, должно остаться неизменным, как эмпирический факт. Флуктуации в концентрациях трещин приводят к их слиянию с точки зрения идеального концентрационного критерия [15].

С нашей точки зрения, образование магистральных трещин на более высоком масштабном уровне обусловлено процессами локализации предварительной неупругой деформации, соответствующей локализацией накопления повреждений на предыдущем, более низком масштабном уровне, и последующего развития магистральной трещины в строго определенном месте мезообъема локализации повреждений. Это означает его разрушение и выход разрушения на макромасштабный уровень. Таким образом, развиваемый подход не просто констатирует факт выхода разрушения на более высокий масштабный уровень, как концентрационный критерий кластеризации, но позволяет определить и место разрушения при явном решении задачи на мезоуровне. Рассмотрение трещин на мезо- и макроуровнях приводит к концентрации напряжений в голове трещин и

появлению там неупругих деформаций. Таким образом, основная идея второй концепции также принимается во внимание как на мезо-, так и на макромасштабном уровнях, как исходное положение, согласно которому трещины соответствующего масштаба выступают как концентраторы напряжений соответствующей мощности. Все принципиально важные последствия такого подхода (появление пластической локализованной деформации, динамика распространения трещины, эффект ее затупления, релаксация напряжений, волновые явления) не отбрасываются (не загоняются в коэффициенты интенсивности), а рассматриваются в явном виде, что является принципиально важным развитием этого направления в механике разрушения.

Хотелось бы сделать несколько замечаний относительно критериев предельных состояний (напряженного либо деформированного). Сейчас стало ясно, что плох не критерий, а его необоснованное применение на макромасштабном уровне (может быть, за исключением инженерных расчетов, где это оправдано). Например, на микромасштабном уровне, в областях высоких концентраций напряжений (в носике трещины независимо от ее масштаба), при статических и квазистатических процессах для материалов, слабо чувствительных к скорости нагружения, и во многих других случаях, когда достаточно феноменологического рассмотрения, а фактор времени не играет роли, оценки, проведенные по критериям предельных состояний, могут быть вполне приемлемыми.

Отметим также, что подход физической мезомеханики существенно отличается от иерархических моделей разрушения, непосредственно следующих из универсального принципа кластеризации, в которых рассматривается иерархия однородных сред - последовательность переходов от низкого масштабного уровня однородной среды к следующему, более высокому масштабному уровню также однородной среды.

Мезомеханика всегда предполагает исходную структурную неоднородность среды на любом масштабном уровне. Эта неоднородность и

является причиной локальной потери сдвиговой устойчивости материалом в областях концентраторов напряжений на соответствующем масштабном уровне при пластической деформации и причиной локализации микроповреждений и последующего макроразрушения при рассмотрении разрушения хрупких материалов.

Из изложенного следует также, что разрушение рассматривается нами не изолированно, как самостоятельное явление, а как специфическая заключительная стадия поведения материала под нагрузкой, включая эволюцию его внутренней структуры, упруго-вязкопластических деформаций и накопления повреждений в процессе деформирования.

Термофлуктуационная концепция и концентрационный критерий кластеризации хорошо вписываются в подход физической мезомеханики, занимая микроскопический уровень зарождения микроповреждений и микротрещин, и выливаются в большое разнообразие кинетик накопления микроповреждений для различных материалов и масштабов явлений разрушения (включая применение критерия кластеризации на мезомасштабном уровне и разработку кинетики накопления мезотрещин).

На момент начала практических работ отсутствовала математическая модель разрушения угля и процесса пылеобразования с использованием методов мезомеханики.

Следует отметить, что представительные эксперименты по разрушению угля под различными видами нагружения крайне затруднены в связи с высокой трудоемкостью, сложностью проведения и непрерывным разнообразием углей. В связи с этим крайне важными являются исследования в области математического моделирования разрушения каменных углей, в том числе с использованием подходов мезомеханики.

Также представляют интерес новые способы изучения структур горных пород с использованием рентгеновской компьютерной томографии высокого разрешения, а также ее применение для установления связей между

внутренней структурой угля и продуктов его разрушения различными способами.

1.3. Контроль отложившейся и витающей пыли в горных выработках

По приборам и способам измерения пыли как витающей в воздухе угольных шахт, так и отложившейся существует достаточно много публикаций. Обзорные работы публиковались как в российской, так и в зарубежной специализированной литературе. В общем случае измерение пылеотложение тесно связано с измерение концентрации пыли, витающей в воздухе поэтому далее будем рассматривать приборное обеспечение как систем для измерения и контроля пылеотложения, так и приборов для измерения витающей пыли в воздухе в одном разделе.

Для получения представления о существующей и разрабатываемой приборной базе был проведен патентный поиск по приборам, методам и полезным моделям связанных с измерением пылевых частиц [40-72].

Остановимся на наиболее типичных представителях приборного парка.

Рассматривая приборное обеспечение контроля пылеотложения были предварительно проанализированы публикации по приборам ППР-1, ППР-2, КПР-1, КОР-1.

Приборы ППР-1 и ППР-2 являлись развитием прибора ДПВ-1 и позволяли определять не только пылеотложение, но запыленность воздуха, содержание негорючих веществ, скорость оседания пыли, дисперсный состав пыли, а также процентное содержание негорючих веществ и уровня влаги в отбираемой пробе пыли. Принцип действия прибора – истекающая из специального сопла струя воздуха подхватывала пыль отложившуюся в выработке и попадала на фильтр прибора, где специальное устройство рассчитывало уровень пылеотложения. Прибор имел возможность определять пылеотложение на стенке выработки. Длительность цикла измерения составляла 5 минут. Достоинством данного прибора являлся большой набор

измеряемых параметров и их комбинаций, отмечалось легкость и компактность прибора.

Другой подход к измерению пылеотложения применялся в приборе КПП-1М: установленный источник бета-излучения создает поток частиц на пробу, состоящую из смеси угольной и породной(сланцевой) пыли, при этом коэффициент отражения варьируется в зависимости от содержания негорючих веществ в пробе. Используя это свойство бета-излучения прибор мог также определять зольность в смеси угольной и сланцевой пыли. Для измерения пылеотложения в комплект прибора входят подложки для сбора оседающей пыли, в тоже время, в качестве подложки можно использовать куски практически любых боковых пород без угольных включений.

Для измерения количества сланцевой пыли в пробе прибор использует принцип сравнения коэффициента отражения бета-излучения от пробы с неизвестным количеством сланцевой пыли и эталонной кюветой полностью заполонённой чистой инертной пылью. Для этого предварительно измеряется коэффициент отражения от кюветы заполненной инертной пылью и далее он сравнивается с коэффициентом отражения при облучении кюветы с пробой отобранной в угольной выработке.

Разработанный в Республике Польша аналогичный прибор «Инфлабар» отличается скоростью определения негорючих веществ в пробе – 30 секунд, при этом имеет вес 3 кг. Для устранения влияния влаги в угольной пыли пробу перемешивают с селикогелем в течении 3х минут, для предупреждения смакования пробы используется акустический вибратор, встроенный в прибор.

Оптический вариант измерения смесей угольной и сланцевой пыли, также рассматривается различными группами исследователей и производителями измерительного оборудования. В конструкции оптического измерителя содержания негорючих веществ используется принцип регистрации отраженного ИК-излучения от смеси угольной и инертной пыли. О приборе, основанном на таком принципе заявлено в [73].

Принцип работы основан на использовании ИК излучения и регистрации отражения от пробы, состоящей из смеси инертной и угольной пыли. Источником излучения может служить специальная лампа накаливания с светофильтром отсекающим видимый диапазон излучения, либо светодиод излучающий в ИК-диапазоне. Приемник отраженного сигнала тоже может быть различным: полупроводниковый фотодиод или фоторезистор. Сигнал получаемый на фотоприёмник усиливается и индицируется на встроенном средстве отображения. Прибор основанный на это принципе должен быть предварительно откалиброван на чистой угольной и чистой сланцевой пыли. Также отмечено влияние влаги на показания прибора, для компенсации этого эффекта проба предварительно сушится путем смешивания с силикагелем с последующем просеиванием. Заявляется точность порядка 3% на пыли одного пласта, после предварительной калибровки. С другой стороны публикации МакНИИ [74] отмечают, что дополнительные факторы влияющие на отражение ИК излучения от смесевой пробы инертной и угольной пыли, такие как дисперсный и химический состав угольной пыли, которые могут вносить дополнительную неопределённость при измерении до 20%. Для борьбы с данными неблагоприятными эффектами требуется калибровка измерительной аппаратуры для каждого угольного пласта.

Несмотря на указанные проблемы при создании портативных устройств есть сообщения [73] о разработке и запуске в производство приборов, основанных на данном принципе измерения.

Исходя из данного обзора представителей портативных приборов следует сделать вывод, попытки создания портативных приборов с малым временем измерения для оперативного контроля пылевзрывобезопасности угольных выработок на момент начала работы над диссертацией столкнулись с различными проблемами: методологическими, техническим, эксплуатационными, метрологическими, что не позволило разрабатываемым экспериментальным приборам решить проблему оперативного контроля пылевзрывобезопасности на угольных шахтах.

Далее рассматривая проблему приборного и методологического обеспечения пылевзрывобезопасности шахт следует отметить методики измерения пылеотложения, на базе приборов измеряющих массовую концентрацию витающей угольной пыли в воздухе горных выработок.

В [76] сообщается о создании системы АДК-3 состоящей из комплекта датчиков, измеряющих концентрацию пыли различных точках горных выработок, а также устройства принимающего данные о запыленности на поверхности и индицирующем уровень запыленности на экране монитора.

Принцип действия датчиков системы – оптический, световой поток излучателя рассеивается угольной пылью, а принимающий фотоэлемент регистрирует рассеянный свет и преобразует его в сигнал который передается на диспетчерский пункт, сообщается, что датчики имеют систему защиты от загрязнения и индикаторы неисправности. Опытный образец системы был изготовлен в 1986 году для проведения испытаний. После проведения испытаний система была рекомендована к производству. Однако производство данной системы не было запущено, к настоящему времени схемотехнические решения данной системы не могут эксплуатироваться совместно с системами АГК на современных шахтах.

Алгоритмы и математические модели расчета пылеотложения с использованием стационарных датчиков, измеряющих концентрацию витающей угольной пыли, являются одним из перспективных направлений по контролю пылеотложения в горных выработках. На момент начала работ по данному направлению, стационарных приборов, которые на постоянной основе измеряют концентрацию угольной пыли не существовало.

Рассмотрим далее приборное обеспечение для оперативного контроля концентрации угольной пыли в воздухе шахт. Начнем рассмотрение с портативных приборов измеряющих массовую концентрацию витающей угольной пыли.

Рассмотрим прибор “SIMSLIN” (“Safety in Mines Light Scattering Instrument”).

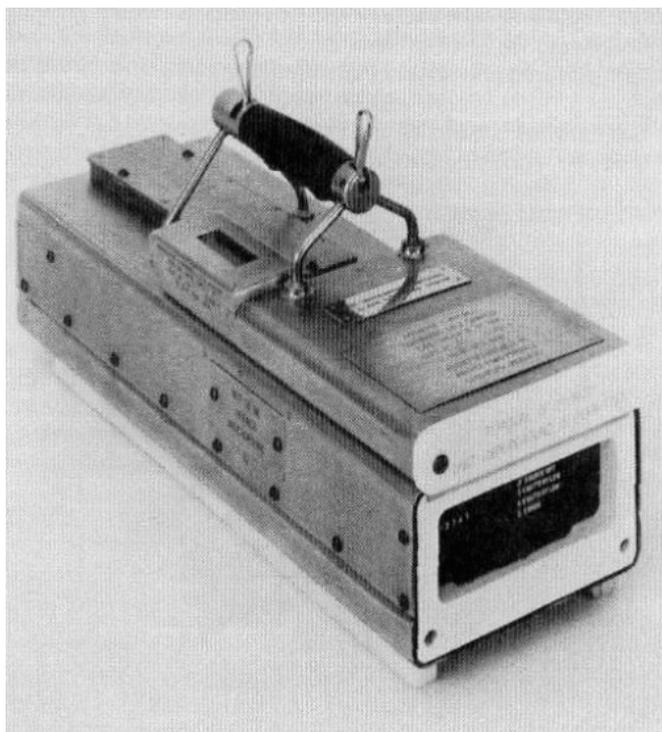


Рисунок 1.1 – Переносной измеритель витающей пыли SIMSLIN

В данном приборе используется принцип рассеяния света на частицах пыли и регистрация оптического излучения и использованием фотоэлемента. Прибор обеспечивает непрерывное измерение концентрации пыли в воздухе на протяжении длительного времени, при этом происходит непрерывная индикация текущего уровня запылённости на дисплее.

В отечественной практике, измерения концентрации пыли в воздухе использовался аспиратор АЭРА, принцип измерения которого основан на весовом методе. Набор пробы осуществлялся оригинальным эжекционным устройством, позволяющим создать поток запыленного с постоянной скоростью через фильтровальный элемент. Постоянная скорость протягивая и фиксированное время набора пробы (для фиксирования времени используется секундомер) позволяет произвести расчет массовой концентрации пыли в воздухе.

Также в производстве находился денситометрический пылемер ДПВ-1, но он не получил широкого распространения на шахтах из-за высокой сложности эксплуатации.



Рисунок 1.2 – Пылемер ДПВ-1

Переносные приборы пылевого контроля использующие для измерения витающей пыли с использованием мягкого бета-излучения разрабатываются в ИПКОН РАН под руководством профессора Кудряшова В.В., в приборах используется принцип поглощения бета-излучения через слой пыли осажденный на высокоэффективный фильтровальный элемент. В данных приборах операция по измерению полностью автоматизирована, одной зарядки аккумулятора хватает на рабочую смену. При добавлении социального циклона-разделителя может измерять массовую концентрацию пыли с разделением на фракции.

Как отмечалось ранее использование стационарных датчиков измерения концентрации пыли может также контролировать и пылеотложение, а соответственно и пылевзрывобезопасность.

Рассмотрим типичных представителей данных стационарных датчиков, а также их место в системе АГК.

Оптические стационарные датчики, такие как ДЗВ-500, FMA-TMS-1, PL-1,2,3 заявляются с возможностью подключения к системам автоматизированного контроля.



Рисунок 1.3 – Стационарный датчик ДЗВ-500

Система “FMA-TMS-1” [77] предназначена для контроля тонкодисперсной пыли находящейся в свободном движении в воздухе шахт. Система состоит из измерительной камеры в которой находится излучатель и фотоприемник, корпуса и блока управления. Размеры измерительного блока 600x300x250, масса комплекта 28 кг. Используется оптическая схема тиндалометрического типа, основанная на рассеянии оптического излучения. В корпусе прибора также находится система защиты оптических элементов от загрязнения оседающей пылью. К недостаткам следует отнести отсутствие практического эффекта от измерения респирабельной фракции в стационарных местах без присутствия персонала, а также высокий вес, составляющий 28 кг. Выпуск данного датчика прекращен в 2000 годы в связи отсутствием спроса.

Серия оптических стационарных пылемеров PL-1,2,3[78] имеет схему измерения, также основанную на эффекте Тиндаля, суть которой заключается в отражении оптического потока излучения определённой длины волны частицами пылевого аэрозоля находящимися в измерительной камере. Максимальные уровни массовой концентрации измеряемой данными

пылемерами до 50-100 мг/м³ в зависимости от модификации. Активные меры защиты оптических элементов не предусмотрены. В руководстве пользователя пылемера PL-3 указано о прочистке оптических элементов с периодичностью раз в две недели (п. 8.2 РЭ), а также тестированию работоспособности с использованием пальца или карандаша ежемесячно (п. 8.1 РЭ) [78].

Стационарный измеритель концентрации пыли с использованием бета-излучения ДАСТ[79] основан на поглощении пылевым осадком бета-частиц испускаемых закрытым источником мягкого бета-излучения Рm¹⁴⁷ (прометий) типа БИП-10. Контроль respirable аэрозольных фракций осуществляется с использованием циклона входящего в комплект поставки. Также в комплект поставки входит пробоотборный зонд и необходимый комплект монтажных приспособлений.



Рисунок 1.4 – Стационарный измеритель ДАСТ

Данный прибор имеет высокую точность измерений, но из-за своей конструкции не может быть применен в шахтах

Выпуск данных приборов производился только для экспериментальных целей, и на предприятиях горной промышленности они не поступали. На распространение данных приборов повлияли следующие недостатки: достаточно высокий вес приборов, наличие источников излучения, а соответственно специальных инструкций по обращению с ними, сложные

процедуры подготовки пробы к измерению, отсутствие метрологического обеспечения, средств и процедур поверки.

Учитывая вышеизложенное, можно отметить.

Обобщенный опыт разработки и проектирования приборов и систем для контроля содержания негорючих веществ показал, что разрабатываемые системы и приборы для контроля пылевзрывобезопасности горных выработок в основном основываются на двух методах: методе с использованием поглощения бета-излучения либо оптическом, основывающемся на измерении отражательной способности пробы. К недостаткам радиоизотопных методов можно отнести ухудшение метрологических параметров при работе с пробами пыли разной влажности, влияние человеческого фактора на использование данного прибора – радиобоязнь. К общим недостаткам оптических методов, в разрезе измерения, проб инертной и угольной пыли следует отнести влияние отражательной способности инертной пыли в пробе со смесью угольной пыли.

Установлено, что приборное обеспечение состояние контроля пылевзрывобезопасности не удовлетворяет современным потребностям производства в оперативности проведения операций по контролю параметров пылевзрывобезопасности, а также выработки решений на основании данных измерений.

Требуется разработка нового метода, позволяющего в оперативном режиме, в месте измерения получать результаты состояния пылевзрывозащиты для вынесения оперативных управленческих решений.

Установлено, что использование любых лабораторных методов, при всех их преимуществах в высокой точности, принципиально не может быть оперативным при контроле запыленности воздуха в горных выработках. Временной разрыв между отбором пробы и получением результатов делает невозможным оперативное управление в шахте в части контроля пылевого фактора. Для решения данного вопроса на основе всестороннего технического анализа существующих методик измерений пыли в воздухе было определено, что мировой опыт разработки приборов пылевого контроля основывается на

трех основных принципах: оптическом, радиоизотопном и гравиметрическом. Причем многие приборы, использующие данные методы измерения, имеют существенный недостаток – требуют калибровки практически для каждого места измерения. Поэтому считаем, что состояние приборной базы для контроля пылевого фактора, а также оснащение данными приборами предприятий не соответствуют вызовам производства, существующим на момент начала исследований данной работы. В связи с этим требуется поиск иной методики и технического устройства, которое позволило бы определять запыленность воздуха непосредственно в месте измерения в оперативном режиме.

Установлено, что использующиеся системы АГК не обладают необходимым набором датчиков для измерения концентрации пылевого аэрозоля в непрерывном режиме, что не позволяет проводить непрерывный мониторинг состояния пылевого фактора в горных выработках. Количество научных публикаций по стационарным датчикам контроля пылевого фактора невелико, а методик, доведенных до экспериментальных образцов приборов, в том числе с проведенными испытаниями на угольных шахтах, мало. Данное неудовлетворительное состояние вопроса по контролю пылевого фактора стационарными приборами позволяет считать, что разработка новой методики и технического устройства на ее основе является актуальной и востребованной задачей для целей охраны труда на современном производстве.

1.4. Обоснование роли влияния человеческого фактора на аварийность, травматизм, профессиональную заболеваемость работников угольных шахт

Как известно, роль человеческого фактора в охране труда трудно переоценить, поскольку основной причиной 70–90 % инцидентов, аварий и несчастных случаев является именно человеческий фактор [80].

Многочисленные исследования ученых не только России, но и во всем мире подтверждают важность (актуальность) изучения роли влияния человеческого фактора на уровень профессиональных рисков (травматизма, профессиональной заболеваемости). Научно доказано, что основной причиной производственного травматизма является сам человек.

Низкий уровень обучения, отсутствие необходимых знаний и навыков безопасных приемов выполнения технологических операций толкают работников угольных предприятий к поиску оптимизации рабочего процесса, что в свою очередь несет потенциальную опасность и чаще всего приводит к аварии, несчастному случаю.

Увеличение нагрузки на подготовительные и очистные забои, объемов добычи угля, изменение технологии ведения горных работ, техническая модернизация угледобывающих предприятий, внедрение интегрированных автоматизированных информационно-измерительных систем на угольных шахтах позволяет значительно снизить профессиональные риски, уровень травматизма, производственно обусловленной и профессиональной заболеваемости шахтеров.

В то же время принимаемые руководством угольных компаний, шахт меры по обеспечению безопасности горного производства далеки от совершенства и не позволяют свести к минимуму уровень производственного травматизма и профессиональной заболеваемости и требуют поиск новых подходов к реальному снижению профессиональных рисков, сохранению жизни и здоровья работников.

В этих условиях, безусловно, возникает проблема опережающего, непрерывного, качественного обучения работников с применением цифровых технологий, новейших методик обучения, тренажеров, позволяющих значительно повысить компетентность работников, снизить показатели травматизма и профессиональной заболеваемости.

Многими учеными отмечается, что даже практически здоровые работники (15–20 %) не в состоянии освоить разные сложности

технологических операций горного предприятия из-за несоответствия психофизиологических параметров требованиям безопасности трудового процесса, что повышает риск травмирования. Значит надо более серьезно подходить к профессиональному отбору при приеме на работу с учетом индивидуальных особенностей человека.

В диссертационной работе Е. М. Неволенной [81] отмечено: «Анализ статистических данных и опыта работы отечественных и зарубежных горнодобывающих предприятий показал, что уровень производственного травматизма обусловлен на 3–7 % опасными условиями труда (горно-геологическими, природными и технико-технологическими факторами) и на 93–97 % опасными действиями персонала: отступлениями от должностных и технологических инструкций, нарушениями правил безопасности, личной неосторожностью. Причинами опасных действий персонала чаще всего являются несоответствие выполняемым функциям профессиональной квалификации и квалификации в области обеспечения безопасности, а также неэффективность использования полномочий – то есть недостаточная компетентность» [81].

В научном исследовании А. Г. Бабенко отмечено: «Определяющее влияние на возможность реализации любых других видов опасностей оказывает деятельность людей. Установлено, что доля аварий по причинам технического характера составляет 5–25 %, а по «человеческому фактору» – 50–90 %, в большинстве случаев аварийные ситуации возникают из-за неверных вынужденных действий работников под влиянием ошибок управления, определения состояния ПП, планирования и проектирования» [82].

Ежегодно протоколами совещаний «Итоги работы угольной отрасли Кузбасса. Меры по улучшению состояния промышленной безопасности» отмечается низкая квалификация персонала и руководящего состава, неудовлетворительная организация производства, нарушение требований безопасности, отрицательное влияние «человеческого фактора» приобретает

системный характер и не позволяет организовывать безопасность ведения горных работ в условиях интенсификации производства.

Пример влияния человеческого фактора на уровень аварийности и травматизма можно наглядно более подробно рассмотреть по результатам проведенного расследования группового несчастного случая на шахте № 7 шахтоуправления «Котинское».

20 января 2013 года в Шахта № 7 шахтоуправления «Котинское» ОАО «СУЭК-Кузбасс» при ведении горных работ по проходке конвейерного штрека 52-09 произошла авария – взрыв метановоздушной среды с тяжелыми последствиями.

Средняя мощность разрабатываемого пласта 52 составляет 4,25 м. Уголь марки ДГ, полублестящий, трещиноватый, средней крепости. Коэффициент крепости угля по шкале проф. Протоdjяконова 0,9–1,5. Уголь хрупкий. Угол падения пласта 10–18°. Непосредственная кровля пласта мощностью до 5–10 м представлена алевролитом мелкозернистым, слоистым, трещиноватым, средней крепости, средней устойчивости с коэффициентом крепости, равным 3–4. Основная кровля пласта мощностью 20–30 м представлена алевролитом от мелкозернистого до крупнозернистого и песчаником, слаботрещиноватыми, средней обрушаемости, крепкими с коэффициентом крепости 6–8. Алевролиты в кровле конвейерного штрека являются опасными по фрикционному искрению. Непосредственная почва пласта представлена алевролитом слоистым с тонкими прожилками угля ($m = 10–50$), трещиноватым, средней крепости, слабоустойчивым с коэффициентом крепости, равным 2–3, не склонным к пучению [83].

Способ проветривания шахты – нагнетательный, схема проветривания – центральная, система проветривания – единая. Воздух в шахту подается 4 вентиляторами ВЦ-15 (коме того, 2 вентилятора ВЦ-15 – резервные). Фактическая подача воздуха вентиляторами главного проветривания составляет 10551 м³/мин. Подача свежего воздуха осуществляется по вентиляционному стволу, а выдача исходящей струи воздуха на поверхность

осуществляется по наклонному фланговому, конвейерному и путевому стволам.

Шахта была отнесена к II категории по метану. После этой аварии шахте установлена 3 категория по метану. Абсолютное метановыделение составляет 29,14 м³/мин, относительное метановыделение – 4,67 м³/т при среднесуточной добыче 9 тыс. т в сутки. Природная газообильность в пределах конвейерного штрека составляет 10–11 м³/т.

Пласт опасен по газу и пыли, угрожаемый по горным ударам, весьма склонный к самовозгоранию (инкубационный период 46 суток), а угольная пыль пласта взрывоопасна (нижний предел взрываемости угольной пыли составляет 26 г/м³). Породы силикозоопасные. По прорыву глины, по внезапным выбросам угля и газа пласт не опасен.

Забой конвейерного штрека 52-09 находится на глубине 352 м, т. е. глубина ведения горных работ намного выше критической по внезапным выбросам угля и газа. Газоносность пласта согласно геологическому отчету равна 11,5 м³/т (для справки – минимальное значение природной газоносности угольных пластов, при которых имели место внезапные выбросы угля и газа на шахтах Кузбасса, составляет 13 м³/т), а это значит, что газодинамические явления исключены.

Паспорт на проведение конвейерного штрека 52-09 выполнен в соответствии с требованиями Правил безопасности [83] и «Инструкции по составлению паспортов выемочного участка проведения и крепления подземных выработок». В Паспорте обоснованы параметры штрека, технология проведения штрека, параметры технологического цикла определены в соответствии с прогнозными горно-геологическими условиями. Графическая часть проекта включает все необходимые разделы; учтены осложняющие горно-геологические факторы; обозначены опасные зоны и меры по повышению безопасности проведения штрека в опасных зонах. Предусмотрены меры по безопасному ведению горных работ в зоне, опасной по горным ударам. Меры разработаны в соответствии с требованиями

«Инструкции по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам» (РД 05-328-99) [84]. На участках с неустойчивой кровлей, в зонах размыва кровли пласта разработаны меры в соответствии с требованиями п. 116 ПБ «Инструкции по расчёту и применению анкерной крепи на угольных шахтах России» [85].

Конвейерный штрек 52-09 проводился проходческим комбайном КП-21 сечением $20,4 \text{ м}^2$, шириной $5,1 \text{ м}$, высотой $4,0 \text{ м}$. Крепление кровли осуществлялось сталеполимерной анкерной крепью [85].

Схема проветривания конвейерного штрека 52-09 общепринятая. Проветривание подготовительного забоя осуществляется вентилятором местного проветривания (ВМП). ВМП устанавливается в вентиляционном стволе на свежей струе воздуха на расстоянии более 10 м от сопряжения сбойки с вентиляционным стволом. Воздух подаётся по вентиляционным трубам диаметром 1000 мм . Исходящая струя воздуха из забоя по конвейерному штреку 52-09 и конвейерному стволу поступает на поверхность. Контроль количества воздуха, подаваемого в забой и дистанционное управление вентилятором местного проветривания, осуществляется аппаратурой «Микон-1Р». Датчик контроля расхода воздуха располагается на расстоянии $10\text{--}15 \text{ м}$ от забоя конвейерного штрека.

Штрек проводится одной заходкой на полную ширину $5,1 \text{ м}$ и высоту штрека 4 м . Длина шага проходческого цикла принята равной 1 м , фактическая площадь обнажения кровли составляет $5,1 \text{ м}^2$, не превышает 10 м^2 . Штрек крепится анкерной сталеполимерной крепью, возведение анкерной крепи производится под защитой временной крепи. В качестве временной крепи используется решетчатая затяжка, подхват из «штрипса» и крепеподъёмник комбайна КП-21.

На шахте № 7 были выполнены мероприятия по устранению причин аварий, связанных с возгоранием метана, с групповыми несчастными случаями, происшедшими на ОАО «Распадская» ЗАО «Распадская угольная

компания» 08.05.2010 г., в филиале «Шахта Ульяновская» и «Шахта Юбилейная» ОАО «ОУК Южкузбассуголь».

На момент аварии в шахте находилось 77 человек, 69 работников вышли на поверхность самостоятельно.

В соответствии с Положением [89] была создана комиссия по расследованию группового несчастного случая.

Проанализировав материалы расследования, выявленные основные нарушения, некомпетентные действия работников шахты, приведшие к аварии с человеческими жертвами [83–90], представим в виде таблицы 1.7.

Таблица 1.7 – Некомпетентные действия, приведшие к групповому несчастному случаю

Нарушение требований безопасности	Причина аварии
Недостаточное количество подаваемого в подготовительный забой воздуха: – расчетное 550 м ³ /мин. – фактически на момент взрыва – снижение подачи воздуха до 130 м ³ /мин.; – отставание вентиляционной трубы более 20 м – в забой поступало не более 20 м ³ /мин. воздуха; – неудовлетворительное состояние вентиляционного става	Человеческий фактор
Игнорирование работниками информации оператора АГК о снижении количества воздуха, подаваемого в проходческий забой, непринятие мер по устранению	Человеческий фактор
Разрыв става вентиляционной трубы дизелевозом и не устранение нарушения вентиляции конвейерного штрека	Человеческий фактор
Выдача наряда и принятие решения заместителем начальника участка по проходке конвейерного штрека, без устранения грубых нарушений требований безопасности, создание аварийной ситуации. Не принятие решения горным диспетчером по приостановке ведения горных работ и устранению нарушений	Человеческий фактор
– Нарушение взрывобезопасности электрооборудования; – Грубые нарушения при эксплуатации пусковой аппаратуры; – Преднамеренное выведение из строя элементов электрической защиты пусковой аппаратуры; – Нарушения при эксплуатации аппаратуры АГК – датчик метана находился в 47 метрах от груди забоя, вместо положенных 3–5 метров (п. 21 Положения [87])	Человеческий фактор
Длина кабеля от зажима на неподвижной части комбайна до вводной коробки была недостаточной при выдвижении телескопа и повороте	Человеческий фактор

Нарушение требований безопасности	Причина аварии
исполнительного органа, что привело к выдергиванию оболочки кабеля из уплотнительного кольца и проникновению метановоздушной смеси внутрь коробки вводов	
Ослабление крепления токоведущих жил кабеля уменьшенного сечения привело к нарушению контакта в зажиме и образованию высокотемпературного источника воспламенения	Человеческий фактор
В групповом пускателе ПВИ-315, питающем электрооборудование конвейерного штрека, промежуточное реле К106 находилось во включенном состоянии из-за блокировки подвижной части посторонним предметом – деревянным клином. Блокировка контакта данного реле выводит из строя электрические защиты пускателя и его управление системой АГК, в т. ч. отключение пускателя при снижении количества воздуха, подаваемого в выработку	Человеческий фактор
Использование для подключения электродвигателя исполнительного органа кабеля сечением основных жил 16 мм ² вместо 35 мм ² , что привело к перегреву токоведущих жил на вводной шпильке электродвигателя и ослаблению крепления кабеля из-за уменьшения диаметра кабеля на вводном фланце и на корпусе комбайна	Человеческий фактор
Отсутствие защиты от выдергивания кабеля привода исполнительного органа комбайна КП-21	Человеческий фактор
Конструкция контактных зажимов в вводной коробке электродвигателя, не обеспечивающая надежного присоединения жил кабеля без наконечников	Человеческий фактор
Выведение из строя блоков электрической защиты пусковой аппаратуры (ПМЗ – блок максимальной токовой защиты, БКИ – блок контроля изоляции) установкой перемычек, а также отсутствие тепловой защиты электродвигателя исполнительного органа комбайна	Человеческий фактор
Механическая блокировка (клином) подвижной части промежуточного реле группового пускателя, что позволило работать при нарушениях проветривания	Человеческий фактор
Отсутствие на комбайне метан-реле ТМРК, предназначенного для выдачи предварительной сигнализации и отключения электроэнергии, подаваемой на забойную машину при достижении в забое заданных уровней объемной доли метана	Человеческий фактор
Значительное завышение вставки срабатывания блока защиты от токов короткого замыкания группового пускателя. Фактическая вставка реле максимально-токовой защиты в момент аварии составляла 7260 А, при расчетном 1500 А, что значительно превышает расчетную	Человеческий фактор
Ослабление контроля за соблюдением требований промышленной безопасности, в том числе руководства по эксплуатации, со стороны	Человеческий фактор

Нарушение требований безопасности	Причина аварии
электротехнического персонала шахты при эксплуатации электрооборудования	
Ослабление контроля за соблюдением требований правил безопасности со стороны инженерно-технических работников участка аэрологической безопасности, в том числе контроля за состоянием проветривания конвейерного штрека 52-09	Человеческий фактор
В реле предварительного контроля изоляции UP6 установлена перемычка, шунтирующая клеммы a1 и v1 – предварительный контроль изоляции был отключен	Человеческий фактор
В пускателе ПВИ-250 БТ, включающем резервный ВМП, отсутствовала механическая блокировка открывания крышки пускателя при включенном разъединителе. На блоке максимальной токовой защиты ПМЗ установлена перемычка на контактах 9,20 – максимально-токовая защита оказалась неисправна и не могла отключить поврежденную линию при возникновении короткого замыкания	Человеческий фактор
В трансформаторной подстанции КТПВ-630/6, питающей электрооборудование конвейерного штрека 52-09, установлен блок максимально-токовой защиты ПМЗ с перемычкой на контактах 9,20 – максимально-токовая защита оказалась неисправна	Человеческий фактор
Наряд на производство работ от 19 января 2013 г. – на 4 смену утвержден заведующим горными работами Кравченко А.П., что противоречит п. 4.1.6. «Положения о нарядной системе», где сказано, что утверждает наряды на производство работ лицо старшего надзора, назначенное приказом по шахте. Приказ по шахте о назначении отсутствует	Человеческий фактор
В книге нарядов участка № 12 не выдавался наряд на устранение нарушений требований промышленной безопасности (нарушен пункт 4.1.10 «Положения о нарядной системе»)	Человеческий фактор
В 4 смену 19.01.2013 г. в книге нарядов проходчик Деркач Д.А., отвечающий за проведение конвейерного штрека 5209 на смене, не ознакомлен с нарядом на производство работ и не проинструктирован по безопасным методам и приемам работ	Человеческий фактор
Книга нарядов не прошнурована	Человеческий фактор
На шахте отсутствовал план осуществления производственного контроля	Человеческий фактор
Не в полном объеме организована подготовка и аттестация работников в области промышленной безопасности. Не аттестован по промышленной безопасности главный инженер в течение одного месяца после назначения на должность с 19.11.2012 г.	Человеческий фактор
Не внесено ни одно предложение руководителю организации о приостановлении работ, осуществляемых на опасном производственном объекте с нарушением требований промышленной безопасности	Человеческий фактор

Нарушение требований безопасности	Причина аварии
С начала 2013 г. работниками участка ВТБ не была проведена ни одна проверка с выдачей предписания в книге предписаний участка ВТБ по конвейерному штреку 52-09	Человеческий фактор
Из-за низкой компетентности 3 работника, не включившись в самоспасатель, погибли от отравления угарным газом	Человеческий фактор

Таких примеров, когда причиной инцидентов, аварий, травматизма является только человеческий фактор, некомпетентные действия работников, создающих опасные ситуации на рабочих местах, неправильные действия в нештатных, аварийных ситуациях, можно привести много, практически каждый случай.

1.4.1. История понятия «человеческий фактор»

В 1921 году была выпущена книга, в которой впервые введен термин «человеческий фактор», автор данной книги – Бенджамин Сиб считается автором данного термина и основоположником введения данного понятия в научный обиход.

Для развития научных подходов использования понятия «человеческий фактор» в 1949 году создаётся «Общество эргономических исследований», далее в 1957 году – «Общество исследований в области человеческого фактора» и в 1959 году – «Международная ассоциация специалистов по эргономике» [81].

Важность учета человеческого фактора в технической деятельности с участием персонала одним из первых была формализована в ИКАО (Международная организация гражданской авиации) включением требований в области человеческого фактора в требования к подготовке авиационного персонала. Далее эти требования развились в специализированные обязательные курсы по подготовке в данной области.

Следует отметить, что в 70-х годах XX века авиационное управления США совместно с НАСА (США) разработало положение, в котором

подчеркивалось, что в случае предоставления данных об авиационной безопасности источник не должен подвергаться наказанию. Данный подход к проблеме влияния человеческого фактора на получение сведений, адекватно отражающих состояние авиационной безопасности для анализа действий человека в аварийных ситуациях, показывает что, получение правдивой информации возможно только при устранении возможности наказания источника информации.

Профессор Элвин Эдвардс (Elwin Edwards) формулирует определение человеческого фактора, которое используется в документах, связанных с ИКАО следующим образом: «Работа в области человеческого фактора (ЧФ) направлена на оптимизацию взаимоотношений между людьми и их деятельности путем системного применения знаний о человеке в рамках конструирования систем» [95].

Также приведем определение, которое использует Международная ассоциация эргономики (IEA):

«Эргономика (или человеческий фактор) является научной дисциплиной, связанной с пониманием взаимодействия между человеком и другими элементами системы».

В работе [82] дано следующее определение «эргономика (от греческого *ergon* – «работа», *nomos* – «закон», или «закон работы») – это область знаний, которая комплексно изучает трудовую деятельность человека в системе «человек – техника – среда» с целью обеспечения эффективности, безопасности и комфорта трудовой деятельности».

В обзорной части этой работы указано, что первые предпосылки эргономики были изложены в 1857 г. Войтехом Ястшембовским и основаны на изучении закономерности науки о природе. В 50-х гг. XX в. после организации «Общества эргономических исследований» начинается развитие и становление эргономики.

Таким образом, человеческий фактор и эргономика имеют одну и ту же научную базу, схожие методы исследований, и одни и те же задачи.

Следовательно, при работе с человеческим фактором могут применяться математические и описательные методы эргономики, которые хорошо зарекомендовали себя ранее.

1.4.2. Обзор определений понятия «человеческий фактор»

Далее для подготовки понятийного аппарата рассмотрим различные определения понятия «человеческий фактор».

В [91] человеческий фактор определён следующим образом:

- 1) психологические и др. характеристики человека, его возможности и ограничения, определяемые в конкретных условиях его деятельности;
- 2) причина несчастного случая, аварии, происшествия в результате неправильных действий человека.

В энциклопедии по охране труда [92] приводится следующее определение. Фактор человеческий – комплекс психофизиологических особенностей человека (восприятие информации, принятие решений, психологические установки и т. п.) и его социальных ролей, играющий важную роль в промышленной безопасности и охране труда.

В словаре [93] приведено такое определение: человеческий фактор

- 1) роль, место и влияние человека как субъекта общественно-исторической и трудовой деятельности;
- 2) в узком смысле – понятие, обозначающее интегральные характеристики связи человека и технического устройства, проявляющиеся в конкретных условиях их взаимодействия.

ГОСТ12.0.002–2014[94] даёт следующую трактовку человеческому фактору:

2.2.66 человеческий фактор: Совокупность личностных характеристик и поведения работающего, вызывающая в процессе трудовой деятельности преднамеренные или непреднамеренные, но неверные, действия различного характера, в итоге приводящие к опасным происшествиям и ситуациям,

инцидентам, авариям, несчастным случаям, производственно-обусловленным и профессиональным заболеваниями.

Международной организация гражданской авиации (ИКАО) считает [95], что человеческий фактор – это «люди в их рабочей среде и их отношения с оборудованием, рабочими процедурами и физическим окружением».

По мнению авторов [96], человеческий фактор предполагает раскрытие содержания индивида с различных позиций:

- единицы трудового потенциала;
- члена семьи;
- гражданина;
- человека, включая совокупность чувств, эмоций, идей и убеждений.

В общем случае, само выражение «человеческий фактор» часто используется в негативном ключе, описывая ситуации, в которых действия, предпринятые человеком, влекут негативные последствия.

В словаре бизнес-терминов [97] дано следующее толкование человеческому фактору:

«Исторически сложившаяся в обществе совокупность основных социальных качеств людей:

- ценностные ориентиры;
- нравственные принципы;
- нормы поведения в сфере труда, досуга, потребления;
- жизненные планы;
- уровень знаний и информированности;
- характер трудовых и социальных навыков;
- установки и представления о лично значимых элементах социальной жизни: о социальной справедливости, о правах и свободе человека, о гражданском долге и т. д.».

В документе Р МЭК 62508-2014 [98] приведен анализ влияния на надежность человеческого фактора:

«3.1.2 эргономика человеческого фактора:

Научная дисциплина, изучающая взаимодействие человека с другими элементами системы, включающая теорию, принципы, данные и методы проектирования с целью оптимизации благополучия человека и полного выполнения системой своих функций.

3.1.9 отказ (человеческого фактора):

Невыполнение человеком действий, необходимых для достижения цели, независимо от причин.

Примечание – Для любой конкретной системы или ситуации отказ человеческого фактора представляет собой комбинацию совершаемых человеком ошибок и нарушений.

3.1.11 надежность человеческого фактора:

Способность человека выполнить задачу в заданных условиях в пределах установленного периода времени с учетом заданных ограничений.

3.1.12 анализ надежности человеческого фактора:

Системный процесс оценки надежности человеческого фактора.

Примечание – Методы оценки могут быть только качественными, но могут обеспечивать и получение количественных результатов».

Данные определения демонстрируют, что конкретный список человеческих свойств, которые лежат в основе определения человеческого фактора, зависит от конкретных видов деятельности человека.

С точки зрения охраны труда наиболее приемлемым является определение человеческого фактора, приведенного в ГОСТ 12.0.002–2014.

«Совокупность личностных характеристик и поведения работающего, вызывающая в процессе трудовой деятельности преднамеренные или непреднамеренные, но неверные, действия различного характера, в итоге приводящие к опасным происшествиям и ситуациям, инцидентам, авариям, несчастным случаям, производственно-обусловленным и профессиональным заболеваниям» [94].

Исходя из приведенного выше определения человеческого фактора можно заключить, что основное различие между эргономикой и человеческим

фактором состоит в том, что эргономика сосредоточена на выработке правильных действий человека при выполнении работы, а специфика человеческого фактора заключается в том, что он привязан, прежде всего, к неправильным (зачастую непредсказуемым) действиям работника, которые приводят к различным происшествиям с разной степенью опасности и несчастным случаям, и, как следствие, к инвалидности и профессиональным заболеваниям.

Человеческий фактор в некотором смысле формирует те задачи, которые должна решить эргономика для сокращения травматизма и профессиональной заболеваемости.

В целом можно отметить, что единого общепринятого определения человеческого фактора не существует, в зависимости от целей и задач исследований формируются самостоятельные определения человеческого фактора, подчеркивающие специфику этих исследований.

1.4.3. Концептуальная модель человеческого фактора «SHEL»

Применяемая сейчас концептуальная модель SHEL, аббревиатура которой составлена из начальных букв английских названий её составных элементов – это «Software», «Hardware», «Environment», «Liveware» [95], впервые была разработана Эдварсом в 1972 г., а затем в 1975 г. дополнена иллюстрирующей её диаграммой Хаукинса (рисунок 1.5).

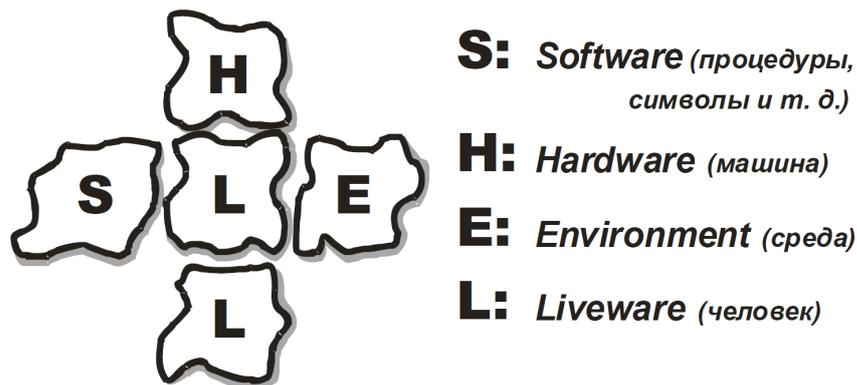


Рисунок 1.5 – Диаграмма концептуальной модели человеческого фактора SHEL

Модель используется для того, чтобы помочь наглядно представить взаимоотношения различных компонентов изучаемой системы «человек-машина».

Для анализа возможных сбоев в системе совместной деятельности рекомендуется исследовать состояние следующих линий взаимосвязи компонентов:

Субъект (человек) (L): обладает следующими наиболее важными характеристиками: физическими, физиологическими, психологическими, психосоциальными.

В модели SHEL показано взаимодействие блоков между собой и человеком как взаимодействие фигур с различными очертаниями границ, данное представление сделано для усиления демонстрации факта о неидеальности взаимодействия между людьми и объектами. Соответственно для снижения вероятности возникновения опасных ситуаций следует иметь ввиду такие несоответствия между всеми членами модели SHEL.

Субъект (человек) – объект (машина) (L-H)

Данное взаимодействие является самым часто рассматриваемым и авизируемым взаимодействием объектов, во всех исследованиях касающихся человеческого фактора.

Субъект (человек) – процедуры (L-S)

Показывает взаимоотношения между документарными системами, обеспечивающими рабочий процесс – инструкции, карты, схемы, контрольные списки, чек-листы и программное обеспечение.

Субъект (человек) – субъект (человек) (L-L)

Отношение между сотрудниками в коллективе показывает отношение как персональное между человеком и человеком, такие отношения между человеком и группами, существующими внутри рабочего коллектива.

Субъект (человек) – окружающая среда (L-E)

Данное взаимодействие показывает влияние на индивидуума внешних факторов, обусловленных погодой, экологией, неблагоприятным воздействием машин и механизмов и т. п.

Практика применения модели SHEL достаточно подробно изложена в документе «Основные принципы учета человеческого фактора в руководстве по проведению проверок безопасности полетов» [95].

В предисловии рекомендаций отмечается необходимость широкого информирования различных государств о важности роли человеческого фактора, важности его учета при организации полетов самолетов гражданской авиации.

Во второй главе [95] приводится «Модель управления ошибками экипажа» (рисунок 1.6), которая была разработана на базе модели SHEL.



Рисунок 1.6 – Модель управления ошибками экипажа

Как видно из данной схемы, человеческая ошибка является неотъемлемой составляющей процессов и полное исключение ее из модели нереально. Демонстрируемая «Модель управления ошибками экипажа» полезна при проверке безопасности не только полетов, а также при оценке того, как осуществляется контроль ошибок человека и устранение этих ошибок.

В третьей главе [95] в разделе «Чрезвычайные происшествия в сложных социотехнических системах» приведена «Модель причинной обусловленности происшествия», разработанная Ризоном [100].

Эта модель удобна для понимания взаимодействия организационных и управленческих (т. е. системных) факторов в системе обеспечения безопасности.

В модели ошибки и нарушения, имеющие немедленные отрицательные последствия, могут рассматриваться как опасные действия. Они обычно ассоциируются с эксплуатационным персоналом и пробивают линии защиты.

Опасные действия могут быть результатом ошибок, совершенных непреднамеренно во время нормального выполнения обязанностей, или преднамеренных нарушений предписанных процедур и практики.

Одним из важнейших факторов в части обеспечения безопасности в модели Ризона являются условия труда на рабочем месте. Неоптимальные, угнетающие условия труда приводят к «отказам» со стороны эксплуатационного персонала, которые можно рассматривать либо как ошибки, либо как нарушения. При этом понимается, что ошибка – это когда работник следует правилам и процедурам, но не может выполнить поставленной перед ним задачи, а нарушение – это когда работник намеренно не следует правилам и процедурам.

В шестой главе [95] вышеупомянутого руководства отмечается важность учета человеческого фактора при различных видах обслуживания летательных аппаратов и приводится схема принятия решений при возникновении таких ошибок обслуживания (Maintenance Error Decision Aid – MEDA).

Следует отметить концепцию, применяемую в MEDA относительно наложения наказания: дисциплинарные методы воздействия накладываются только в случае прямого и очевидного нарушения установленных регламентом процедур. После проведения всестороннего технического и организационного расследования события или предпосылки к созданию аварийного события, и определения ответственных за данную ситуацию по регламенту должен быть предоставлен доступ к информации всем членам коллектива, которых затрагивает данный технологический процесс. Далее до сотрудников доводятся меры, принимаемые для улучшения процесса и снижения возможности повторения инцидента.

В седьмой главе [95] руководства рассматривается роль человеческого фактора в процедурах контроля и управления воздушным движением.

В данной главе приведен разбор и анализ ошибок при управлении воздушным движением (УВД), который показывает, что невнимание,

забывчивость или отсутствие бдительности проявляются более чем в 50 % всех нежелательных происшествий.

Отмечены различные факторы, влияющие на качество принимаемых решений, и аспекты трудоспособности операторов, осуществляющих управление воздушным движением: рабочая нагрузка; работа в коллективе; оценка и логика суждения; стресс; скука; посменная работа; усталость; передача информации; системы контроля; автоматизированное оборудование; старение оборудования; ситуационная осведомленность.

В заключении главы сформулированы требования к отбору и обучению авиадиспетчеров с учетом человеческого фактора.

Следует отметить, что применительно к охране труда модель SHELL является одной из немногих, явным образом использующих понятие «человеческий фактор». В то же время в модели отсутствуют прямые связи с классами условий труда, что важно для охраны труда в России.

1.4.4. Подходы к измерению человеческого фактора

Активные меры по снижению влияния человеческого фактора на травматизм и профессиональную заболеваемость невозможны без измерения человеческого фактора в целом или его составляющих.

Наличие количественных и качественных способов оценки некоторых величин, характеризующих человеческий фактор, имеет решающее значение в системе управления человеческим фактором.

В связи с этим рассмотрим сформировавшиеся подходы к оценке человеческого фактора.

ГОСТ Р 12.0.010-2009 [101] приводит перечень опасностей, напрямую связанных с персоналом (работником), выполняющим поставленную перед ним работу, другими словами, данный список – это набор опасностей, который представляет человеческий фактор:

1. Недостаточные: образование, профессиональная подготовка, квалификация, стаж, опыт и т. д.

2. Недостаточный уровень внимания, самодисциплины; неадекватность поведения; нарушение требований нормативных правовых, технических и локальных актов, касающихся охраны труда и т. д.

3. Существенно отличные от предусмотренных техническими характеристиками оборудования антропометрические данные (рост, вес) и т. п.

4. Несоответствующие работе состояние здоровья (телесное, духовное, социальное), возраст, пол работника, образ жизни.

В другом документе, ГОСТ Р 31010-2011 [102], приводится метод Human Reliability Assessment (HRA), который может применяться для определения степени воздействия оператора на работу контролируемой системы.

Важная особенность метода HRA – возможность его применения как для оценки качественного поведения, так и возможность получения количественной оценки работы оператора. В случае использования HRA для поиска и идентификации ошибок, на основе полученной информации можно сделать предложения по изменению рабочих процедур. Также данный метод позволяет количественно оценивать отказы, предпосылки к различным неправильным действиям и т. п., напрямую связанные с оператором.

Разработчики стандарта отнесли к недостаткам используемых подходов в данном методе:

– Большая вариабельность поведения персонала резко повышает трудность работы по определению даже простых видов отказов оборудования и персонала, а также снижает точность оценки вероятности возникновения данных событий.

– Вводимые понятия «работоспособное» и «неработоспособное» состояние не всегда могут описать действия персонала, достаточно сложным или невозможным становятся описания ситуаций с частичным отказом.

Сложно описываются состояния, вызванные отказами из-за принятия неправильных решений.

Вместе с тем положительным примером реализации данного подхода (Метод HRA) к оценке влияния действий человека может являться математическая модель ошибок оператора [103].

В модели частота промахов оператора оценивается при помощи выражения (1.1).

В процессе обучения частота промахов имеет тенденцию к уменьшению. Установилось мнение, что процесс обучения достаточно хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией:

$$q = q_c + (q_0 - q_c)e^{-\frac{n}{N}}, \quad (1.1)$$

где q_c – установившееся (стационарное) значение частоты промахов, характерное для обученных операторов; q_0 – начальное значение частоты промахов (до обучения); n – накопленная сумма сигналов, предъявленных оператору в предыдущих опытах, и половина числа сигналов в данном опыте; N – «постоянная обучения», характеризующая продолжительность обучения оператора [103].

При $n = N$ разность $(q_0 - q_c)$ уменьшена на 63 %. Считается, что значение q_0 достигается через $(4-5)N$.

В данном случае человеческий фактор измеряется частотой промахов оператора.

Анализ приведенных выше и других работ [104, 105] по данной проблематике позволяет отметить, что большая часть методик являются качественными или оценивают влияние только отдельных характеристик человека, например, стрессоустойчивость [105] или частоту промахов оператора [104].

Данные методики могут послужить для задания вектора направления по развитию количественной оценки человеческого фактора, но на сегодня

имеют те же ограничения, что и модель SHELL, а именно, отсутствует прямая связь с классами условий труда, принятыми в России.

1.4.5. Элементы управления человеческим фактором

Несмотря на то, что человеческий фактор, как это следует из приведенных выше определений этого понятия (термина), касается всего человеческого общества, в данной работе прежде всего он используется как комплекс особенностей человека, играющий важную роль в охране труда.

Управление человеческим фактором производится системой сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающей в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия, то есть охраной труда [106].

Управление охраной труда имеет довольно сложную структуру, которую с упором на человеческий фактор можно упрощенно представить в виде трех уровней.

1. Государственное управление охраной труда [106].

Государственное управление – это управление системой сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности в целом.

В частности, государство:

– устанавливают порядок организации и проведения обучения по охране труда работников и контролирует их соблюдение;

– устанавливает критерии условий труда и контролирует их соблюдение.

2. Система управления охраной труда в организации [107].

Система управления охраной труда – это ключевой элемент общей системы управления организации, обеспечивающий безопасность трудовой деятельности работников производства.

В частности, организация со своей системой управления охраной труда должна:

– разрабатывать, внедрять и поддерживать установленные (документированные) процедуры, гарантирующие идентификацию опасностей, оценку, регулирование и контроль риска травматизма и профессиональной заболеваемости;

– выявлять потребности в обучении персонала для компетентного выполнения работ и проводить обучение по охране здоровья и безопасности персонала;

– обеспечивать условия труда, при которых воздействие на работников вредных, опасных производственных факторов исключено либо уровни их воздействия не превышают установленных гигиеной труда.

3. Система управления личной безопасностью работником.

Эта система включает в себя 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.

Кроме того, в эту систему входят знания конкретных сведений по охране труда, умения и навыки выполнения безопасных методов и приемов выполнения работы и т. п.

В первом приближении, в управлении фактором можно выделить три основных направления:

1. Управление за счет обучения безопасным методам и приемам выполнения работ до требуемого уровня компетентности работника в сфере безопасности труда.

2. Управление за счет создания условий труда, при которых воздействие на работающих вредных и (или) опасных производственных факторов исключено либо уровни их воздействия не превышают установленных нормативов, в том числе с использованием средств индивидуальной защиты.

3. Управление за счет разработки и внедрения машин, механизмов, транспортных средств, технологических процессов, средств индивидуальной и коллективной защиты, которые должны соответствовать не только

государственным нормативным требованиям охраны труда, но и человеческому фактору.

В заключение обзора подходов к решению вопросов безопасности, связанных с человеческим фактором, можно констатировать следующее:

1. Роль человеческого фактора в охране труда трудно переоценить, поскольку основной причиной 70–90 % инцидентов, аварий и несчастных случаев является именно человеческий фактор.

2. Исторически и идеологически человеческий фактор связан с эргономикой, и основное различие между эргономикой и человеческим фактором состоит в том, что эргономика сосредоточена на выработке правильных действий человека при выполнении работы, а специфика человеческого фактора заключается в том, что он привязан, прежде всего, к неправильным (зачастую непредсказуемым) действиям работника, которые приводят к опасным происшествиям, инцидентам, авариям и несчастным случаям, и, как следствие, к инвалидности и профессиональным заболеваниям.

3. Анализ действующих моделей человеческого фактора показал, что даже концептуальные модели позволяют создавать действенные алгоритмы управления человеческим фактором. Вместе с тем следует отметить, что большая часть методик оценки человеческого фактора являются качественными или оценивают влияние только отдельных характеристик человека, например, стрессоустойчивость или частоту промахов оператора.

4. С учетом специфики человеческого фактора, в управлении фактором можно выделить три основных направления: обучение работников по охране труда; создание безопасных и безвредных условий труда или обеспечение работников эффективными средствами коллективной и индивидуальной защиты; разработка и внедрение машин, механизмов и т. п., которые должны соответствовать требованиям человеческого фактора.

5. Несмотря на свою доказанную эффективность, количество моделей человеческого фактора не покрывает необходимую потребность, например, отсутствуют модели, связывающие человеческий фактор с гигиеническими

критериями условий труда, поэтому разработки в этом направлении имеют практическую значимость и очевидную актуальность.

6. Проведенный обзор показал, что отсутствуют (не обнаружены) модели персонального управления человеческим фактором, которые включали бы в себя 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.

Обобщая проведенный выше анализ состояния и проблем обеспечения контроля пылевой обстановки горных выработок угольных шахт с учетом человеческого фактора, можно прийти к следующему.

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, обеспечивающих 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.

Выводы по главе

Анализ современного состояния и проблем обеспечения контроля пылевой обстановки горных выработок угольных шахт с учетом человеческого фактора показал, что:

– традиционные способы контроля пылевой обстановки не отвечают требованиям производства что привело к возникновению острой проблемы оперативного контроля пылевой обстановки горных выработок в угольных шахтах и как следствие невозможности своевременного принятия необходимых мер по снижению рисков аварийности и профессиональной заболеваемости.

– для решения данной сложной проблемы необходим комплексных 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 тема исследований комплексного контроля пылевой обстановки горных выработок угольных шахт с учетом человеческого фактора является актуальной.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ

2.1. Общие положения

Представим задачу о деформации и разрушении мезообъемов угля, а также покажем постановку начальных условий.

Уголь является неомогенной многокомпонентной средой преимущественно органического происхождения. В общей постановке, проблемы разрушения угля для размерности «макро» достаточно хорошо изучены. Данным проблемам посвящено, достаточное количество экспериментальных и теоретических работ, опубликованных за последние десятки лет. Применимость данных работ, в настоящее время, для инженерных расчетов удовлетворительная, набрана хорошая база практических результатов. В тоже время, остается во многом нерешенная проблема, получения достаточного количества достоверных результатов касательно интегральных макроскопических показателей и характеристик для наборов углей различного состава. В настоящее время, несмотря на большой прогресс в экспериментальных методах и приборах, изучение всего диапазона существующих углей, представленных в различных бассейнах, не представляется возможным. В тоже время, с нашей точки зрения, используя подходы мезомеханики, возможно решение данной проблемы.

Рассматривая задачи разрушения угля на уровне мезообъемов, следует отметить, другую немаловажную проблему – образование пылевых частиц в результате процессов разрушения.

В данной работе будем численно изучаться механическое поведение, до начала разрушения, различных мезообъемов угля, включая созданный представительный мезообъем, при различных вариантах нагружения:

комбинированное нагружение, сжатие в различных направлениях, приложения сдвигающих сил.

Суммарный отклик разработанного представительного мезообъема с заданным составом, концентрациями компонентов, формой, а также зонами соприкосновения, позволяет получить макроскопическую σ – ε диаграмму угля, определить физические параметры нагрузки для этого макроскопического образца, в том числе и предельные.

Обработка результатов нагружения, подсчет количества новых элементов после проведения нагружения образцов, позволяет прогнозировать выход пыли при различных условиях нагружения, концентрационных долей размеров от 2 до 100 мкм.

В общем случае, для решения этих двух проблем, необходимо определить и решить ряд частных задач:

1. Создать представительный мезообъем угля и обосновать выбор характерных размеров и состава, адекватно описывающих природные свойства угля.
2. Определить и создать уравнения каждой структурной составляющей, включая:
 - выбор физико-механических параметров компонентов: предельных значений напряжений и деформаций, модулей упругости, при которых происходит разрушение структурных элементов;
 - определить кинетические уравнения накопления повреждения под нагрузкой для каждого структурного элемента мезообъема;
 - установить кривые механического отклика (σ – ε диаграммы) элементов представительного мезообъема, включая стадии упругой реакции, вязкопластической деформации и стадию накопления повреждений.

Для решения данных задач введем следующие масштабные структурные уровни: микроуровень и мезоскопический уровень для создаваемого представительного мезообъема.

Уровень, на котором будут накапливаться, в рамках решения данной задачи, микроповреждения и микротрещины – микроскопический масштабный уровень.

На мезомасштабном уровне, элементы мезоструктуры, которые непосредственно влияют на поведения мезообъема, были определены явно в предыдущей работе диссертанта [108].

В дальнейшем, при развитии работ в выбранном направлении, данные эффекты могут быть учтены в полной мере на соответствующих уровнях: макро- и мезо-.

Отметим, что данный подход позволяет учитывать различные эффекты, возникающие при нагружение физической экспериментально среды: дилатансии – увеличения объема за счет возникновения большого количества трещин в микрообъемах, общее накопление повреждений, различные виды релаксации, деградацию и изменения механических свойств.

Сейчас, основная часть исследователей выступает на позиции концепции высокомолекулярного строения угля, в тоже время, не исключая наличия вкраплений низкомолекулярных фрагментов [14]. Исходя из этого утверждения, стоит рассматривать уголь как высокомолекулярные соединения [15]. В [15] показывается, что природный уголь является достаточной мере саморегулирующимся материалом, который изменяет свою структуру в широких пределах в зависимости от приложенного внешнего воздействия, либо при изменении внешних условий на границах рассматриваемого объема. Данное обстоятельство требует дополнительного исследования в рамках расширения модели, и в рамках текущей работы не будет учитываться.

Работы по изучению угля с позиции физики полимеров добавило в общую теорию дополнительные уровни структурной организации его

элементов – надмолекулярная организация (НМО). «Под НМО понимается внутренняя структура, взаимное расположение в пространстве и характер взаимодействия между структурными элементами, образующими макроскопическое тело» [12, 13]. Рассматривая элементы НМО на предмет установления размеров и отнесения к одному из масштабных уровней, следует сделать вывод, что элементы структурного уровня с размерами 1-100 нм следует отнести к микроскопическому масштабному уровню, аналогичному индивидуальным линейным дефектам в кристаллических решетках твердых тел.

В общем случае установить прямую связь между элементами надмолекулярной организации с макроскопическими элементами при исследовании поведения угля под нагрузкой не представляется возможным. Требуется движение вверх по структурно-иерархической лестнице до мезоскопического масштабного уровня – того уровня который в прямом виде определяют структуру макроскопической частицы угля.

Обращаясь к рентгеноструктурным исследованиям, можно предположить, что уголь нельзя отнести ни истинно кристаллическим, ни к истинно аморфным веществам, считается, что он находится в промежуточном состоянии [109, 110–125]. Данное утверждение важно для общего понимания реологических свойств компонентов угля на исследуемом уровне.

В данной работе, для создания структурной модели, достаточно реалистично описывающей механическое поведение угля, следует изучить макроструктуру угля, и определить важные, с точки представительства, компоненты с заданными степенями углефикации и метаморфизма – для включения в создаваемый мезообъем. Данные макрочастицы угля будут по своим механическим свойствам эквивалентны микроскопическим частицам угля и повторять их поведение.

Для общего описания компонентов угля на мезоструктурном уровне, определении свойств на данном уровне требуется связать данные по НМО структурных элементов с физико-механическими свойствами данных

элементов. Далее, для понимания тонкой мезоструктуры угля, следует обратиться к исследованиям метаноемкости, степени газоотдачи угля, как открывающим дорогу к пониманию физических и механических характеристик элементов мезоструктурного уровня. Исследования иерархии, существующей в сорбционных частицах, численных значений параметров сорбционных микропор, облаков пор, объединенных поровых объемов дают необходимый материал для понимания организации угля на мезоуровне. Данные связанные с сорбцией наиболее полно описывают изученную тонкую структуру углей на мезоуровне.

Изначально рассмотрим уровень соответствующий – «макро».

В настоящее время данный иерархическо-структурный уровень описан наиболее полно, широкое распространение данных исследований связано с требованиями промышленности, и в основном ориентировалось на технологии связанные оптимизации добычи и переработки угля. Выполнены различные группировки по генетическим классам и типам углей. Данная ситуация связана с огромным разнообразием вариаций содержания компонентов (литотипов), а также с резкими изменениями физико-механических свойств компонентов угля в зависимости от степени метаморфизма в ряду углефикации. Все это приводит к невозможности дать строгую численную оценку физико-механических свойств угля как единого целого.

Такие описательно-качественные свойства углей как трещиноватость, коэффициент хрупкости, коэффициент крепости, дробимость, показатель пластичности (определяемый в баллах) успешно применяются в горных науках, неприменимы для использования при построении прочностных расчётных систем. Общая трещиноватость угля – наличие в угле системы трещин различных размеров, со своей иерархической структурой, делает каждый пласт угля уникальным по своим характеристикам. Сильное влияние на определение физико-механических свойств угля также накладывает структурная организация исследуемого материала, как пример, модуль Юнга, измеряемый для одного и того же типа угля, но с использованием различных

методов, может отличаться на порядок [14, 109]. Динамический метод измерения модуля Юнга показывает более высокое значение, чем статический метод.

Исходя из вышеизложенного, важное значение приобретают, численные методы моделирования по нагружению мезообъемов угля, различного состава, произвольно задаваемого экспериментатором, позволяющие получить суммарные макроскопические характеристики угля как единого целого, в том числе, его прочностные характеристики по известным, хорошо определённым физико-механическим параметрам компонентов микроскопического уровня.

При возрастании степени углефикации связанной с потерями водорода (H_2) в форме метана (CH_4), потерями воды, кислорода в форме углекислого газа (CO_2) возрастает содержание углерода по соотношению к кислороду и водороду [14]. Данное обстоятельство корректирует физико-механические характеристики как угля в целом, так и его составляющих микрокомпонентов. Данные процесс хорошо изучены и отображены в генетической классификации углей [14,12,126–138], а также в исследованиях надмолекулярной организации и ее влияния на физико-технические свойства угля и его микрокомпонентов.

В публикациях отмечается, существует и хорошо наблюдается закономерность изменения упругих свойств в ряду углефикации рисунки 2.1–2.3. По данным [124] изменения микротвердости по линии углефикации имеет максимум при содержании углерода 84 % и достигает минимума при возрастании количества углерода до 90 %. Антрациты, имеющие максимальное содержание углерода 93 %, ведут себя как «идеальные пластики» [36].

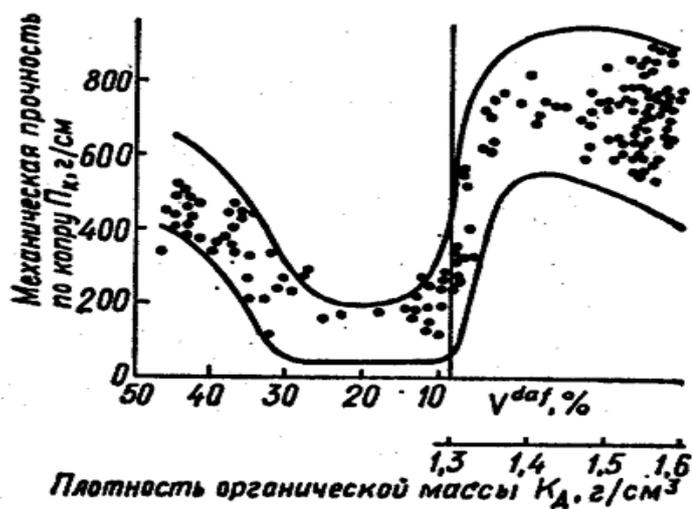


Рисунок 2.1 – Зависимость механической прочности углей от выхода летучих веществ и плотности органической массы в ряду углефикации

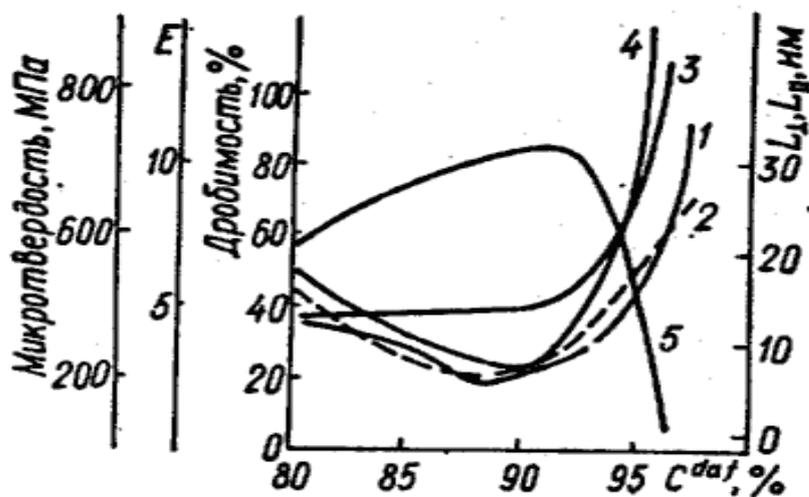


Рисунок 2.2 – Зависимость механических свойств углей от степени метаморфизма и НМО: 1 – микротвердость (по Касаточкину); 2 – модуль Юнга E (по Касаточкину); 3 – L_{\parallel} – размеры НМО, нм; 4 – L_{\perp} – размеры НМО, нм; 5 – дробимость (по Русачеву)

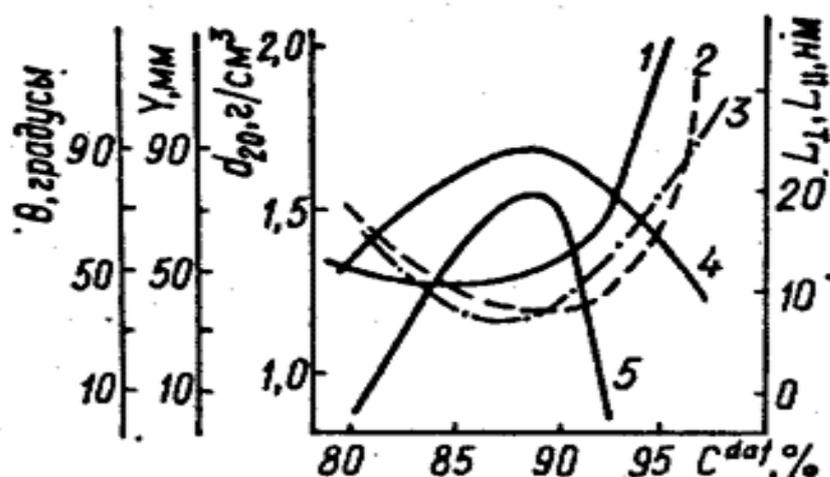


Рисунок 2.3 – Зависимость механических свойств углей от степени метаморфизма и НМО: 1 – плотность витринита d_{20} ; 2 – L_{\parallel} – размеры НМО, нм; 3 – L_{\perp} – размеры НМО, нм; 4 – краевой угол смачивания θ ; 5 – высота пластического слоя Y

Хотя на настоящий момент не создана общепринятая генетическая классификация углей существующие классификации «не имеют принципиальных отличий» [14]. Далее при упоминании классификации углей будем придерживаться классификации приведенной в работе [14].

По происхождению различают следующие угли – сапропелевые (сапропелиты) и гумусовые (гумиты).

На макроуровне уголь представляет собой гетерогенную среду, состоящую из частей (ингредиентов или литотипов). Приведем литотипы составляющие гумусовые угли, как наиболее полно изученные: витрен, кларен, дюрен и фюзен – далее приведем их качественную оценку.

Витрен – хрупкий, существует в виде слоев черного цвета толщиной до 3-10 мм, при расслоение частички имеют форму кубиков, хорошо просматривается сеть тонких трещин.

Кларен – состоит из тонких чередующихся слоев витрена, дюрена, и иногда фюзена.

Дюрен – слои дюрена более мощные (до 10 см), очень крепок.

Фюзен – встречается в форме линз, толщиной до нескольких миллиметров, волокнистый, мягкий, рыхлый.

Далее, рассматривая, сапропелевые угли отметим, что они существенно отличаются от подгруппы гумусовых углей. В сапропелитовых углях отсутствует слоистость, плотность их выше, они имеют более однородный состав. Сапропелевые угли подразделяются на кеннели, богхеды и множество различных переходных разновидностей [14, 139].

Данная интегральная классификация, хотя и является грубой, в первом приближении, достаточна, чтобы составить карты механических свойств угля различных классов, учитывая разнородный состав компонентов. Эта задача решается уже на уровне мезо-.

Рассмотрим понятие «трещиноватости» на макроуровне. Разрабатываемый представительный мезообъем не должен содержать трещин, по своей протяженности сопоставимых с размерами мезообъема. Но в то же время, мезообъем должен содержать мезотрещины, но это уже относится к поврежденности на микроуровне.

В таблице 1.19 приведены сводные характеристики различных видов углей, а также характеристики, касающиеся трещиноватости. Данная информация совместно с оценками других прочностных характеристик углей и его компонентов, приведенных в таблице 1.3 имеет значение при сравнении отклика на воздействие между экспериментальными и теоретическими данными.

Оценивая размеры разрабатываемого мезообъема, обратимся к средним расстояниям между макротрещинами – обычно приводятся размеры порядка 0,5–4 мм, поэтому оценим размеры нашего разрабатываемого объема на 0,5 мм такого мезообъема который заведомо располагается без зон пересечения с трещинами.

Рассмотрим следующие структурные элементы угля мезоскопического масштабного уровня – микролитотипы. Данные структурные элементы возникли в результате различных биохимических и геохимических

превращений, под воздействием разнообразных условий, что привело к большому количеству практически однородных по химико-физическим свойствам компонентов угля, которые относятся к микролитотипам или микрокомпонентам. В международной терминологии данные компоненты называются мицералы.

Разрабатываемый мезообъем угля, являющийся компаундом – полимерным композитом органического происхождения, будет являться набором элементов мезоуровня, которыми будут являться микролитотипы. Отношение микролитотипов внутри мезообъема, наличие различных трещин, пор и т. д., а также размерами мезоскопического масштаба будут определять механическое поведение мезообъема угля. А далее, поднимаясь на следующий масштабный уровень, представительный мезообъем будет определять механические характеристики угля определённого состава.

Рассматривая исходные данные для подготовки моделирования, определено, что в настоящее время выделено до 35 литотипов, а также промежуточных форм микрокомпонентов. В том числе, разработана нормативная документация [140], которая регулирует процедуры и методы определения состава углей по микрокомпонентам. Данная нормативная документация далее будет использоваться для определения характеристик создаваемого мезообъема.

Таблица 2.1 – Типы тектонических структур углей [140]

Тип угля		Характеристика угля в пласте	Тектоническая структура	Степень нарушенности	Характеристика угля в аншлифе			Прочность угля
Обозначение	Наименование				Трещины	Среднее расстояние между трещинам, мм	Среднее зияние трещин, мм	
I	Ненарушенный	Характеризуется заметно выраженной слоистостью. Разламывается на куски, ограниченные слоистостью и трещинами	Слоистая слаботрещиноватая	Ненарушенное строение	Редкие трещины эндогенного происхождения	4,0	0,027	Крепкие
II	Мелкокусковатый	Слоистость и трещиноватость затушеваны. Слабоустойчив к механическим воздействиям	Брекчиевидная	Слабо нарушенное строение	Частые эндогенные и экзогенные трещины	1,90	0,015	Относительно крепкие
III	Разлинзованный	Слоистость и трещиноватость затушеваны, слагается из отдельных линз. При механическом воздействии на уголь линзы распадаются на более мелкие линзочки, иногда при раздавливании превращаются в угольную мелочь	Линзовидная (мелколинзовидная)	Сильно нарушенное строение	Эндогенные затушеваны экзогенными, иногда сдвинуты по плоскостям эндогенных	1,20	0,010	Рыхлые, легко растираются

Тип угля		Характеристика угля в пласте	Тектоническая структура	Степень нарушенности	Характеристика угля в аншлифе			Прочность угля
Обозначение	Наименование				Трещины	Среднее расстояние между трещинам, мм	Среднее зияние трещин, мм	
IV	Землисто-зернистый	Слоистость и трещиноватость затушеваны. Состоит из мелких зерен угля, между которыми располагается землистый уголь (угольная мука). В массиве слабо устойчив к механическим воздействиям	Землисто-зернистая	Раздроблены	Эндогенных не видно, экзогенные образуют сетку	0,88	0,005	Слабые, легко растираются до пыли
V	Землистый	Состоит из тонко перетертого угля (угольная мука). В массиве неустойчив, осыпается интенсивно	Землистая	Раздроблены	Сплошная сетка экзогенных, частично сливающихся с трещинами позднего происхождения	0,56	0,004	Напоминают IV тип, иногда несколько крепче

Таблица 2.2 – Микролитотипы по ГОСТ 9414-74 [141]

№	Литотип	Характеристика
1	Группа витринита	Наиболее распространена. Средняя стадия углефикации (R^0 от 0,64 до 1,85). При нагревании пластичен. В группу входит бесструктурный коллинит и теллинит. В структурном витрините ячейки часто состоят из коллинита, а стенки ячеек из теллинита. Содержит множество микротрещин, хрупок. Раскалывается на мелкие призмы и кубики вплоть до тонкой пыли. В зависимости от степени углефикации плотность изменяется от 1,27 до 1,86 г/см ² . Минимальная плотность установлена при 87 % содержании углерода
2	Группа семивитринита	По физическим свойствам занимает промежуточное состояние между витринитом и фюзинитом (ближе к витриниту). Микрокомпоненты – бесструктурный семиколлинит и семителлинит (характеризуется наличием клеточной структуры)
3	Группа фюзинита	Обладает высокой абразивной твердостью и микротвердостью. Микрорельеф резко выражен, клеточное пространство либо пустое, реже заполнено минералами. Плотность около 1,5 г/см ² . В ряду углефикации физические и химические свойства практически не меняются
4	Группа лейптинита	Микротвердость компонентов группы лейптинита меньше, чем у витринита и фюзинита. Микрокомпоненты (споринит, кутинит, резинит) состоят из спор кутина, суберина, воска, жиров и масел растительного происхождения. Форма и размеры микрокомпонентов этой группы варьируются в зависимости от происхождения. Споринит является легчайшим компонентом угля (плотность от 1,18 до 1,28 г/см ²), обладает высокой абразивной прочностью. Встречается в больших количествах в палеозойских углях, основной компонент лейптинита. Микрокомпонент кутинит сходен со споринитом, но не идентичен ему, встречается в виде сдвоенных полос, одна из которых более ровная, а вторая волнистая или зубчатая. Физические свойства и прочность кутинита близки к свойствам споринита. Резинит состоит из разнообразных смоляных включений в виде структурных элементов (телец) различной формы и размеров (зерен, овалов, палочек). Плотность от 1 до 1,2 г/см ² , абразивная твердость близка к абразивной твердости витринита
5	Группа альгинита	Включает компоненты, слагающие сапропелиты (кальгинит и тальгинит). Кальгинит является основной бесструктурной сапропелевой массой, цементирующей в угле форменные элементы и минеральные вещества. Тальгинит – представлен колониями водорослей, имеющих определенную форму и размер
6	Группа микстинита	Тонкая смесь компонентов группы витринита с минеральными (в основном глинистыми) примесями или с микринитом с размером частиц до 2 мкм. Входит как микрокомпонент
7	Минеральные примеси	Представлены глинистым материалом, сульфидами, кальцитом, кварцем, прочими минералами

Таблица 2.3 – Физико-механические характеристики угля и его составляющих

Физико-механические характеристики	Уголь	Витринит	Семивитринит	Фюзинит	Лейптинит	Минеральные примеси	Воздух
Петрографический состав, %	100	70,25	1,49	16,47	2,38	8,11	1,26
Микротвердость, МПа	200	300	350	1800	200	-	-
Размеры, мм	По рисунку						
Объемный вес, г/см ³	1,3						
Удельный вес, г/см ³	1,3	1,25	1,3	1,4	1,7	2,5	2,0
Пористость, %	5,8						
6.1 4 трещины							1,26
6.2 4 трещины и поры радиусом более 1 мкм							5,77
1–1,6 R (мкм)		13,53	10,92	6,10	2,38		
1,6–2,5 R (мкм)		5,26	3,36	4,57	2,38		
2,5–4		3,76	1,68	3,05	2,38		
4–6,3		3,01	0	1,52	1,59		
6,3–10		5,26	0	0	0,79		
10–16		24,06	0	0	0		
16–25		11,28	0	0	0		
25–40		3,76	0	0	0		
Предел прочности при сжатии, МПа	15	23	28	135	15	80	
Предел прочности при растяжении, МПа	1,5	2,3	2,8	13,5	1,5	8	
Модуль Юнга, Е, ГПа	13	20	23	115	13	60	
Коэффициент Пуассона	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	
Модуль сдвига, μ , ГПа	5	7,14	7,93	39,66	4,64	29,74	

В соответствии с принятыми стандартами [140], все компоненты угля подразделены на семь групп, таблица 2.2, а физико-механические свойства и характеристики которых представлены в таблице 2.3.

В настоящее время в России, выполнена часть методологических исследований касательно выделения микролитотипов, микрокомпонентов из прослоек не менее 50 мкм [142], хотя в общем случае данная работа важна для правильной оценки технологических свойств углей. Общая номенклатура данных компонентов рекомендована Международным комитетом по петрологии углей. В таблице 2.4 представлены основные (главные) группы микролитотипов углей.

Таблица 2.4 – Микролитотипы углей

Микролитотип	Главные группы составляющих микрокомпонентов (мацералов)	Число основных групп микрокомпонентов
Витрит	Витринит	Мономацерал
Лейптит	Экзинит или лейптинит	Мономацерал
Фюзит	Инертинит (исключая микронит)	Мономацерал
Кларит	Витринит, экзинит	Бимацерал
Дюрит	Инертинит, экзинит	Бимацерал
Витринертит	Витринит, инертинит	Бимацерал
Дюрокларит	Витринит, экзинит, инертинит	Тримацерал
Клародюрит	Инертинит, экзинит, витринит	Тримацерал

Как упоминалось ранее, на основании исследования процессов десорбции и сорбции, были сделаны выводы о размерах суперсорбционных и фильтрационно-сорбционных частиц. Большой уровень запасенного метана, составляющий до 100 м³/т связан с большими объемами порового пространства в исходном материале, а также изменениями микроструктуры порового пространства под воздействием внешних сил. Как отмечалось ранее, данная система пор имеет иерархическую организацию – присутствует две системы пор с диаметрами $d_1 \approx 2,25$ нм и $d_2 \approx 1,75$ нм. Общее количество микропор (ψ) в 1 грамме угля оценивается $\psi \approx 1 \div 4 \cdot 10^{18}$ (1/г) при общей площади пор $S \approx 20-80$ м².

Заполнение порами угля не равномерно, а образует различные структуры распределённые по всему объёму угля и имеющие свои сгущения, и зоны разрежения [14, 143], группы пор в объёме, создают кластер, который принято называть сорбционной частицей – «фильтрационное поровое пространство разбивает частицу угля на некоторые отдельные, которые частично, или полностью, окружены фильтрационными каналами. Такие отдельные можно рассматривать как самостоятельные элементы макроструктуры угля» [14, 143]. Далее мы будем считать, что данные первичные фильтрационно-сорбционные частицы (ФСЧ-1) – это минимальные элементы мезоуровня, из которых в дальнейшем слагаются мезоструктуры и именно они, при разрушении образуют высокодисперсную пыль.

Переходя на более высокий размерный уровень, к переходным каналам, которые имеют размеры порядка ($d_n=10^{-5} \div 10^{-6}$ м или $d_n=1 \div 10$ мкм), выделим фильтрационно-сорбционные частицы второго порядка (ФСЧ-2).

Данные переходные каналы были добавлены в мезообъёмы угля, на которых проводились расчеты нагружения, и было принято следующее упрощение - переходные каналы в своём сечении имеют вид окружности. Именно данные каналы и определяют размер фракций пылевых частиц в зависимости от строения угля, содержания микрокомпонентов и пор. Для моделирования рассматривался промежуток размеров для частиц 2–100 мкм.

Поднимаясь выше по размерам структур, перейдем к микроканалам диаметром $d_m=10 \div 1000$ мкм, а также к микротрещинам – это уже элементы мезоструктуры. Поры размерами свыше 10–50 мкм следует учитывать на мезоуровне, когда их концентрация становится достаточной для влияния на прочностные характеристика моделируемого мезообъёма. Данное условие было выполнено в расчетах.

Экспериментальными данными, по сорбированию метана различными фракциями угольной пыли, было установлен размер суперсорбционных частиц уровня ФСЧ-2, как менее 200 мкм. Используя характерный размеры

ФСЧ-2, порядка 10–100 мкм, данные структурные элементы были сгенерированы случайным образом и помещены в разрабатываемый представительный мезообъем. Именно случайное распределение данных структурных элементов – мезопор двух иерархий определило распределение частиц по фракциям в диапазонах 2–100 мкм. Структуры которые стали прообразом данных элементов мезообъема приведены на рисунках 2.4 и 2.5.

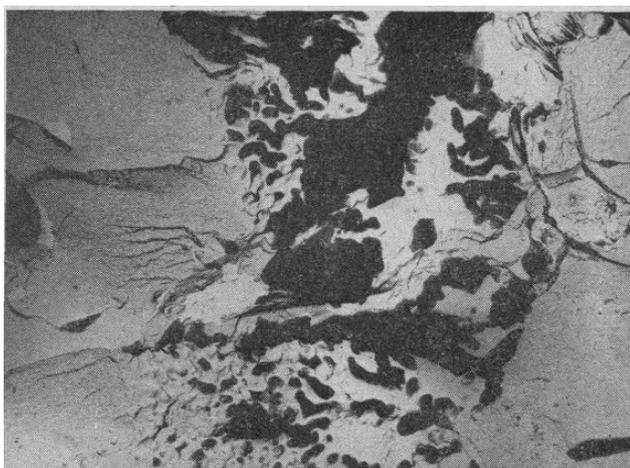


Рисунок 2.4 – Разворот отдельностей с образованием ядра супермилонита, x5000

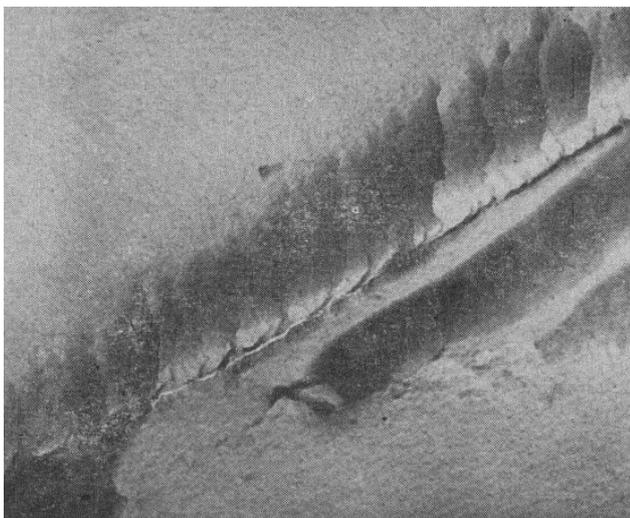


Рисунок 2.5 – Образование супермилонита при сдвиге отдельностей, x20000

Существующая ненулевая возможность возникновения упорядоченности пор в угле может существенно изменить данные случайные допущения. Поэтому была предложена структура представительного мезообъема угля с заданным составом, как с присутствием пор мезоскопического размера, так и без пор. Прочностные характеристики микрокомпонентов создаваемого мезообъема приведены в таблице 2.3.

Приведем формальную постановку математической задачи.

Для моделирования механики деформируемого твердого тела и для решения задач разрушения угля на мезоскопическом уровне в каждом из вариантов постановки задачи использовались следующие методы решения: вариационно-разностный метод для получения решений о состоянии деформируемого твердого тела, а также о возникновении внутренних напряжений в гетерогенном представительном мезообъеме; также для решения задач в динамической постановке использовался конечно-разностный математический подход.

Общие алгоритмы решения задачи возникновения напряжений в структурно-неоднородных (гетерогенных) материалах были использованы при создании серии программ для проведения численных вычислений с на компьютерах. Данный подход к алгоритмам позволил решать задачи нагружения в нелинейной постановке [144].

Для решения задачи нагружения твердого тела в квазистатической постановке использовался вариационно-разностный метод, который основан на вариационных уравнениях. Для решения задачи деформации твердого тела как анизотропного пластичного материала используется теория инкрементальной пластичности К. Васидзу.



	Лейтинит	2,31%
	Витринит	68,00%
	Мин. примеси	7,70%
	Воздух	5,77%
	Фюзинит	14,75%
	Семивитринит	1,47%

Рисунок 2.6 – Представительный мезообъем угля с поровым пространством

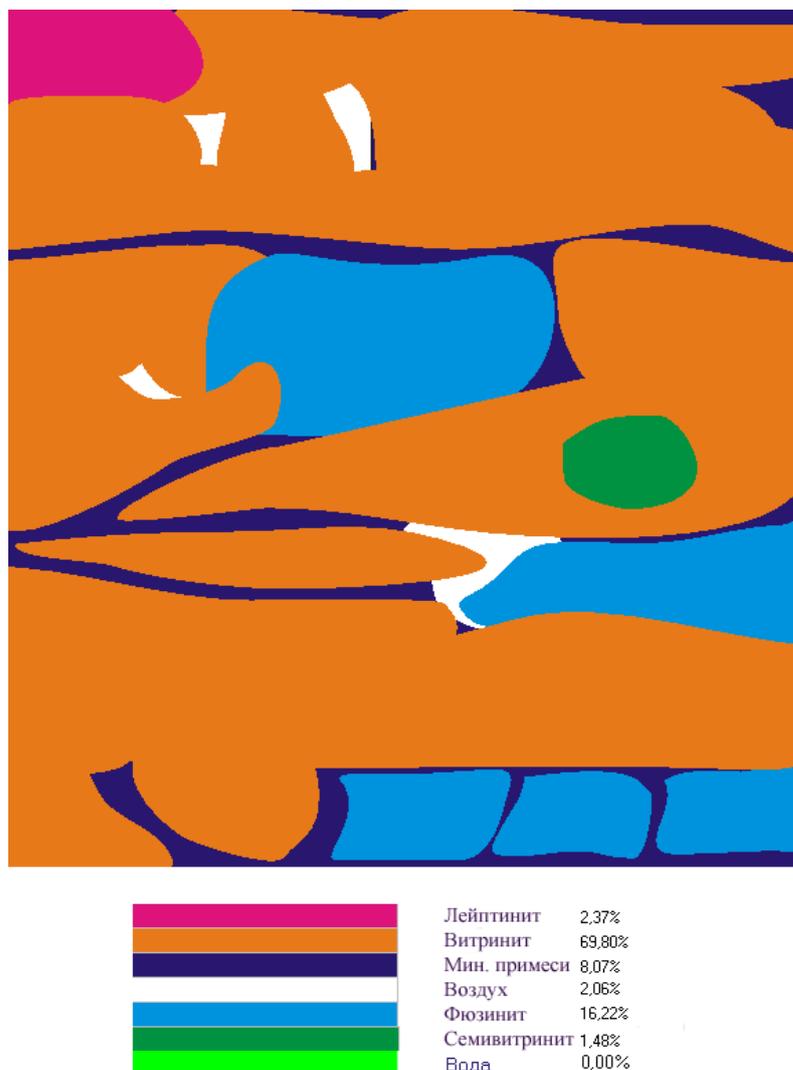


Рисунок 2.7 – Схема представительного мезообъема угля без пор

Идеи этого подхода к решению происходят из рассмотрения последовательностей равновесий в процессе изменения геометрических и механических состояний $\Omega^{(0)}, \dots, \Omega^{(n)}, \Omega^{(n+1)}$, здесь $\Omega^{(n)}$ – каждое состояние равновесия. Далее принимая во внимание что, согласно инкрементальной теории пластичности, рассматриваемые состояния $\Omega^{(n)}$ бесконечно близки между собой, можно линеаризовать уравнения которые характеризуют состояние на каждом шаге (инкременте), по приращениям каждой переменной из набора описывающего состояние в окрестности состояния $\Omega^{(n)}, \Omega^{(n+1)}$.

Для решения квазистатической задачи упруго-вязкопластического изменения представительного мезообъема гетерогенного вещества

используется вариационно-разностная схема на основе вариационного уравнения Лагранжа.

$$\begin{aligned} & \iiint_V (\sigma_{ij}^E + \Delta^* \sigma_{ij}) \cdot \delta(\Delta^* e_{ij}) \cdot dV^{(n)} + \iiint_V (\sigma_{ij}^E + \Delta^* \sigma_{ij}) \cdot \delta(\Delta^* \omega_{ij}) \cdot dV^{(n)} - \\ & - \iiint_V (\bar{P}_i + \Delta \bar{P}_i) \cdot \delta(\Delta u^i) \cdot dV^{(n)} - \iint_{S_\sigma} (\bar{R}_i + \Delta \bar{R}_i) \cdot \delta(\Delta u^i) \cdot dS^{(n)} = 0 \end{aligned} \quad , \quad (2.1)$$

где \bar{P}_i, \bar{R}_i – обозначение объемных и поверхностных сил на каждом шаге нагружения, $\Delta \bar{P}_i, \Delta \bar{R}_i$ – обозначение приращения объемных и поверхностных сил на следующем шаге нагружения; $\Delta u^i, \delta(\Delta u^i)$ – изменение каждой компоненты вектора перемещений и их вариации; $\Delta \sigma_{ij}^E + \Delta^* \sigma_{ij}$ – модифицированный тензор напряжений Кирхгофа.

На каждом последующем шаге $\Omega^{(n+1)}$ вычислений за исходное состояние принимается состояние $\Omega^{(n)}$. Расчет ведется в переменных Лагранжа X_j . Индекс (n) в уравнении (2.1) показывает на связь координат на следующем шаге с равновесным состоянием полученным на предыдущем шаге.

Во время вычисления последнего интеграла по шагам учитываются наложенные граничные условия по напряжениям. В тоже время граничные условия по перемещениям – накладываются во время вычисления по боковым поверхностям.

При этом предполагается, что соотношения среды могут быть линеаризованы и записаны в виде:

$$\Delta^* \sigma_{ij} = C_{ijkl}^* \cdot \Delta^* e_{kl} - \beta_{ij}^* \cdot \Delta T, \quad (2.2)$$

где ΔT – изменение температуры на очередном шаге по времени или параметру нагрузки (при переходе из текущего состояния равновесия $\Omega^{(n)}$ к новому состоянию равновесия $\Omega^{(n+1)}$). В области упругих деформаций тензор $C_{ijkl}^* = C_{ijkl}^T$ совпадает с тензором изотермических упругих постоянных

анизотропного тела, а соотношения (2.2) представляют собой уравнения Дюамеля-Неймана. В области пластических или вязкоупругих деформаций тензор касательных модулей C_{ijkl}^* зависит также от вида функций пластичности, релаксации и ползучести. Тензор температурных напряжений β_{ij}^* зависит от коэффициентов термического расширения, касательных модулей C_{ijkl}^* и температуры T . В тех случаях, когда главные оси ортотропии материала не совпадают с осями лабораторной системы координат, используются формулы преобразования коэффициентов при повороте координатных осей. Расчетные схемы задач пластичности были модифицированы для моделирования поведения вязкоупругих композитов.

Конечно-разностный аналог вариационного уравнения (2.1) строится на основе аппроксимации пространственных производных от перемещений по формуле вида:

$$\text{grad}(T)^{(n+1)} \Big|_{P(X_1, X_2, X_3) \in \Delta V} = T^{(n+1)} \cdot d_{,j} \cdot \vec{i}_j = \frac{\iint T^{(n+1)} d\vec{S}}{\iiint_{\Delta V} dV}, \quad (2.3)$$

где $\Delta V, \Delta S$ – объем и площадь ячейки конечно-разностной сетки, построенной в расчетной области (рисунок 2.8); $(n+1)$ – номер шага по времени, под $T^{(n+1)}$ подразумевается одна из компонент вектора перемещений.

В настоящей работе использован способ построения конечно-разностных уравнений, который основан на представлении основного элемента разностной сетки – шестигранного прямоугольного параллелепипеда – в виде составного элемента, который может быть двойным образом собран из пяти тетраэдров.

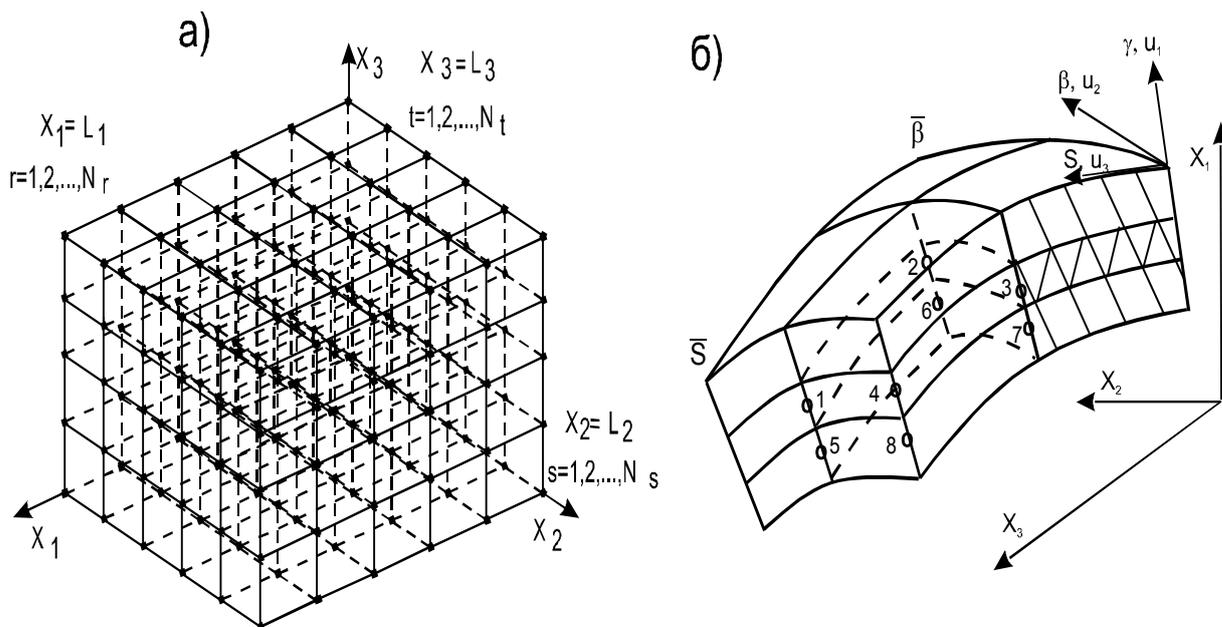


Рисунок 2.8 – Конечно-разностная сетка в исходной конфигурации для расчета в декартовой (а) и криволинейной (б) системах координат

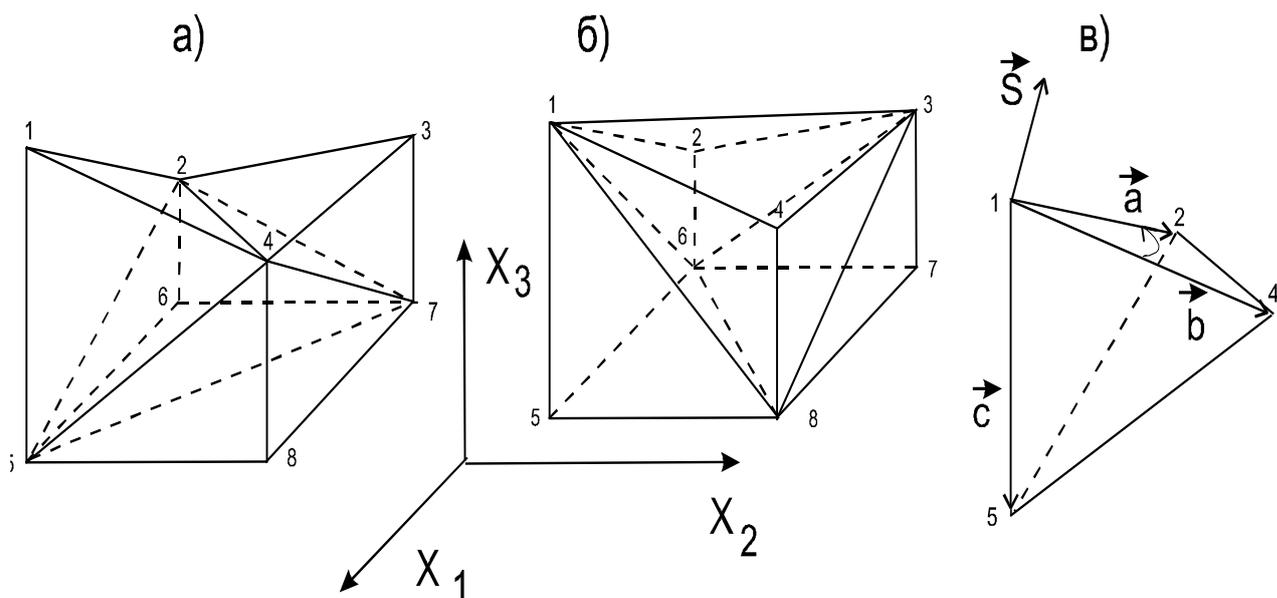


Рисунок 2.9 – «Красное» (а) и «черное» (б) разбиение элементарного двенадцатигранника, а также схема вычисления площади граней и объема тетраэдра (в)

Такое разбиение может оказаться полезным для повышения точности описания границ раздела в неоднородных материалах.

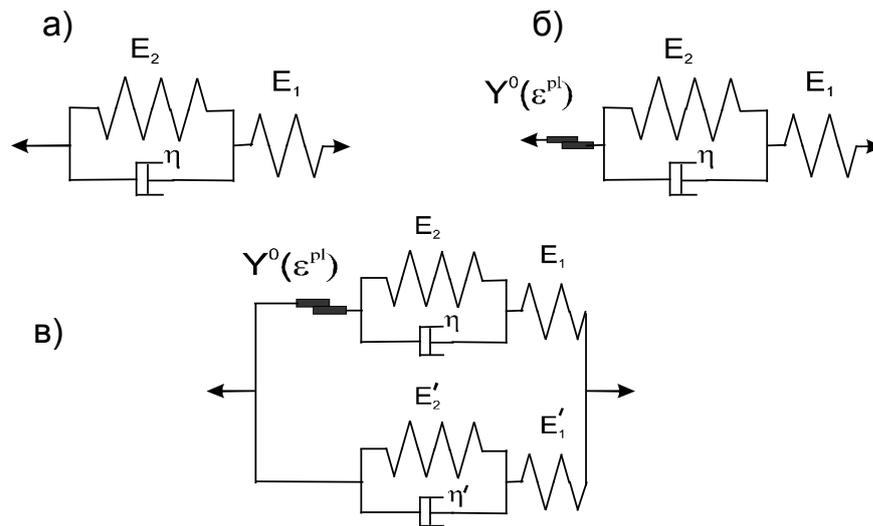


Рисунок 2.10 – Схема модели вязкоупругой (а) и упругопластической среды при параллельном (б) и последовательном (в) соединении элементов

На каждом шаге по деформациям использовались линейризованные определяющие уравнения модели упруго-вязкопластической среды. Материальная точка сплошной среды схематично может быть представлена в виде последовательного и параллельного соединения пластического и вязкоупругого блоков, как показано на рисунке 2.10. Вязкоупругий блок моделирует медленные процессы релаксации напряжений и развитие деформаций ползучести. Пластический блок моделирует пластические деформации, упрочнение материала и накопление микрповреждений в материальной точке сплошной среды.

В зависимости от схемы соединения принимаются допущения об аддитивности деформаций и равенстве напряжений в элементах, или об аддитивности напряжений и равенстве деформаций:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{ij} &= d\varepsilon_{ij}^{el} + d\varepsilon_{ij}^{pl} + d\varepsilon_{ij}^{cr}, \\ d\sigma_{ij} &= d\sigma_{ij}^{el} = d\sigma_{ij}^{cr} = d\sigma_{ij}^{pl}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij} &= d\sigma_{ij}^{el} + d\sigma_{ij}^{cr} + d\sigma_{ij}^{pl}, \\ d\varepsilon_{ij} &= d\varepsilon_{ij}^{el} = d\varepsilon_{ij}^{cr} = d\varepsilon_{ij}^{pl}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Для вязкоупругих составляющих полной деформации в данной работе использованы интегральные определяющие уравнения соотношения линейной вязкоупругости вида:

$$\sigma_{ij}(t) = R_{ijkl}(t) \cdot \varepsilon_{kl}^{cr}(0) + \int_0^t R_{ijkl}(t - \tau) \cdot \frac{\partial \varepsilon_{kl}^{cr}(\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{ij}^{cr}(t) = J_{ijkl}(t) \cdot \sigma_{kl}(0) + \int_0^t J_{ijkl}(t - \tau) \cdot \frac{\partial \sigma_{kl}(\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (2.7)$$

где $\varepsilon_{kl}^{cr}(t)$ – линеаризованный тензор деформаций ползучести.

Тензор функций релаксации для изотропного тела имеет вид:

$$R_{ijkl}(t) = \frac{1}{3}[G_2(t) - G_1(t)] \cdot \delta_{ij} \cdot \delta_{kl} + \frac{1}{2}G_1(t) \cdot [\delta_{ik} \cdot \delta_{jl} + \delta_{il} \cdot \delta_{jk}], \quad (2.8)$$

В данной работе для функции релаксации напряжений сдвига $G_1(t)$ и гидростатического напряжения $G_2(t)$ были использованы выражения

$$G_\alpha(t) = G_\alpha^0 + \sum_{\kappa=1}^{K_\alpha} G_\alpha^\kappa \cdot e^{-\frac{t}{t_{G_\alpha^\kappa}}}, \alpha = 1, 2, \quad (2.9)$$

где t – время; G_1^κ, G_2^κ – модули релаксации напряжений сдвига и гидростатического напряжения, соответственно; $t_{G_\alpha^\kappa}$ – времена релаксации.

Определяющие уравнения в настоящей работе построены на основе предложенной в работе [146–149] модели упругопластических материалов с повреждениями, для которых характерны эффекты деформационного упрочнения, накопления микро- или мезоповреждений, приводящих к деградации материала и появлению нисходящей ветви « σ - ε » диаграммы.

В данной работе модель модифицирована для более полного учета различий в поведении материалов при сжатии и растяжении, а также зависимости свойств от температуры. Термоупругопластические деформации определяются ассоциированным законом пластического течения, выражениями для функции пластичности $f(\sigma_{ij}, \beta, T)$ и критерия текучести:

$$d\varepsilon_{ij}^{pl} = \frac{1}{H} \cdot n_{ij} \cdot \left(\frac{\partial f(\sigma_{rs}, \beta, T)}{\partial \sigma_{kl}} \cdot d\sigma_{kl} \right), \quad (2.10)$$

$$f(\sigma_{ij}, \beta, T) = s_{ij} \cdot s_{ij} - 2p(\beta) \cdot (I_1^0 - \sigma_{kk}) \cdot F(\gamma, T) = 0, \quad (2.11)$$

где $p(\beta) = p_0 - \text{sign}(\sigma_{kk})p_1 + [(1 - \text{sign}(\sigma_{kk})\delta) \cdot (2/3)I_1^0 / a]\beta - \beta^2$,

$\beta = a \cdot \varepsilon_{kk}^{pl}$, $\gamma = \frac{\varepsilon_{kk}^{pl}}{\varepsilon^D}$; H – функция упрочнения;

$n_{ij} = \frac{\partial f(\sigma_{rs}, \beta, T) / \partial \sigma_{ij}}{\sqrt{(\partial f(\sigma_{rs}, \beta, T) / \partial \sigma_{rs}) \cdot (\partial f(\sigma_{rs}, \beta, T) / \partial \sigma_{rs})}}$ – нормированный тензор,

характеризующий градиент функции пластичности в пространстве напряжений; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_{kk} / 3$ – девиатор тензора напряжений; ε_{kk}^{pl} – объемная пластическая деформация; $p_0, p_1, \delta, I_1^0, a$ – параметры модели, которые описывают пластические свойства материала.

Эти параметры определялись в тестовых расчетах по справочным данным для начальных пределов текучести при одноосном растяжении $\sigma_{0,2}$ и сжатии $\sigma_{0,2C}$, временного сопротивления течению при растяжении σ_B и сжатии σ_{BC} . Значение параметра пластического разрыхления $\varepsilon^D = (\rho^D - \rho_0) / \rho_0$ (ρ_0 – плотность пластически недеформированного материала, ρ^D – плотность материала при достижении временного сопротивления течению) оценивалось по имеющимся в литературе данным об изменении плотности материалов при пластическом деформировании. С

помощью функции $F(\gamma, T)$ в условии (2.11) учитывается эмпирическая зависимость пределов текучести от температуры.

Из уравнений (2.11) при частных случаях нагружения материала в условиях одноосного растяжения–сжатия для расчета параметров модели следуют формулы вида:

$$\begin{aligned}
 I_1^0 &= \sqrt{(\sigma_B)^2 + (\sigma_{BC})^2 - (\sigma_{0,2})^2 - (\sigma_{0,2C})^2} / (2\varepsilon^D), \quad p_0 = \frac{\sigma_{0,2}^2 + \sigma_{0,2}^2}{6I_1^0}, \\
 p_1 &= \frac{\sigma_{0,2}^2 - \sigma_{0,2}^2}{6I_1^0}, \quad \delta = \frac{(\sigma_{B,})^2 - (\sigma_B)^2 + (\sigma_{0,2})^2 - (\sigma_{0,2C})^2}{(\sigma_B)^2 + (\sigma_{BC})^2 - (\sigma_{0,2})^2 - (\sigma_{0,2C})^2}, \\
 a &= \sqrt{\frac{I_1^0}{3\varepsilon^D} [1 - \text{sign}(\sigma_{kk})\delta]}, \\
 F(\gamma, T) &= \frac{1}{2}\gamma \{f_B^2(T) + f_{BC}^2(T) - \text{sign}(\sigma_{kk})[f_{BC}^2(T) - f_B^2(T)]\} + \\
 &+ \frac{1}{2}(1-\gamma) \{f_{0,2}^2(T) + f_{0,2C}^2(T) - \text{sign}(\sigma_{kk})[f_{0,2C}^2(T) - f_{0,2}^2(T)]\},
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

где $f_B(T), f_{BC}(T), f_{0,2}(T), f_{0,2C}(T)$ – функции, показывающие, во сколько раз уменьшается соответствующий предел текучести при температуре T по сравнению с его значением при температуре 293,15К.

Эта модель пластичности использована как элемент комбинированной модели упруговязкопластической среды. Формулы (2.4)–(2.11) после линеаризации в окрестности актуального состояния равновесия в момент времени t_N приводят к уравнению:

$$\Delta\sigma_{pq}(t_{N+1}) = \tilde{C}_{ijpq}^* \Delta\varepsilon_{ij}(t_{N+1}) + \tilde{\Psi}_{pq}(t_{N+1}), \tag{2.13}$$

где тензор \tilde{C}_{ijpq}^* зависит от вязкоупругих и пластических свойств материала, а функции $\tilde{\Psi}_{ij}(t_{N+1})$ определяются предысторией вязкоупругих деформаций.

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

$$\dot{V}/V - \dot{u}_{i,i} = 0; \quad (2.14)$$

– уравнения движения

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j}; \quad (2.15)$$

– соотношение для тензора скоростей полных деформаций

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i}). \quad (2.16)$$

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

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

$$\dot{S}_{ij} = 2\mu\left(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\delta_{ij}\right) \text{ при } S_{ij}S_{ij} < \frac{2}{3}Y^2, \quad (2.17)$$

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

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

$$l = \frac{3\mu}{Y^2} S_{ij}(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\delta_{ij}). \quad (2.18)$$

Здесь Y – локальный предел текучести материала.

Модель позволяет принимать во внимание упрочнение материала, т. е. рассматривать $Y=Y(\mathcal{E}^p)$. Однако вопрос об упрочнении на мезоуровне для ингредиентов угля требует специального рассмотрения и не входит в рамки настоящей работы.

Так как расчетный мезообъем находится в окружении такой же неоднородной среды, то по своим границам он испытывает силовые воздействия, которые изменяются во времени и в пространстве. Точное задание таких граничных условий в явном виде представляет сложную задачу. В представленном случае расчетов можно обойтись более простым приближенным заданием граничных условий, имитирующих условия нагружения (сжатие, сдвиг и т. д.)

При обсуждении результатов условия нагружения будут указаны. Выписанная система уравнений, вместе с начальными и граничными условиями, определяют краевую задачу, которая решалась численным методом, аналогичным методу Уилкинса.

Приведем результаты расчетов деформации и разрушения мезообъемов угля, рассмотрев следующие три задачи:

1) построение определяющих уравнений для составляющих уголь ингредиентов;

2) решение задачи об интегральной реакции мезообъёма угля на нагружение с целью прогнозирования механических свойств угля по составу и известным характеристикам составляющих ингредиентов;

3) решение задачи о деформации и разрушении угля и об образовании пылевых частиц.

В результате построения кривых механического отклика на нагружение основных ингредиентов угля были построены кривые течения для лейптинита, витринита, семивитринита, фюзинита и достаточно прочных хрупких минеральных примесей.

Для решения поставленной задачи, в рамках модели, описанной выше по известным механическим характеристикам характерных литотипов угля (таблица 2.3) были построены определяющие уравнения для компонентов угля. Упруго-вязкопластическая модель ингредиентов угля учитывает накопление микроповреждений. Вместе с вязкопластической реакцией наблюдаются также эффекты разбухания материала за счёт раскрытия микротрещин и деградация материала из-за нарастающей с ростом напряжений поврежденности, что и дает интегральную неупругую реакцию компонентов на нагружение.

Эти диаграммы показаны на рисунке 2.11 в координатах: интенсивность деформаций (ϵ) – интенсивность напряжений (S). Именно эти определяющие уравнения использовались в расчётах на нагружение мезообъёмов угля (рисунки 2.6, 2.7) при решении задачи в квазистатической постановке.

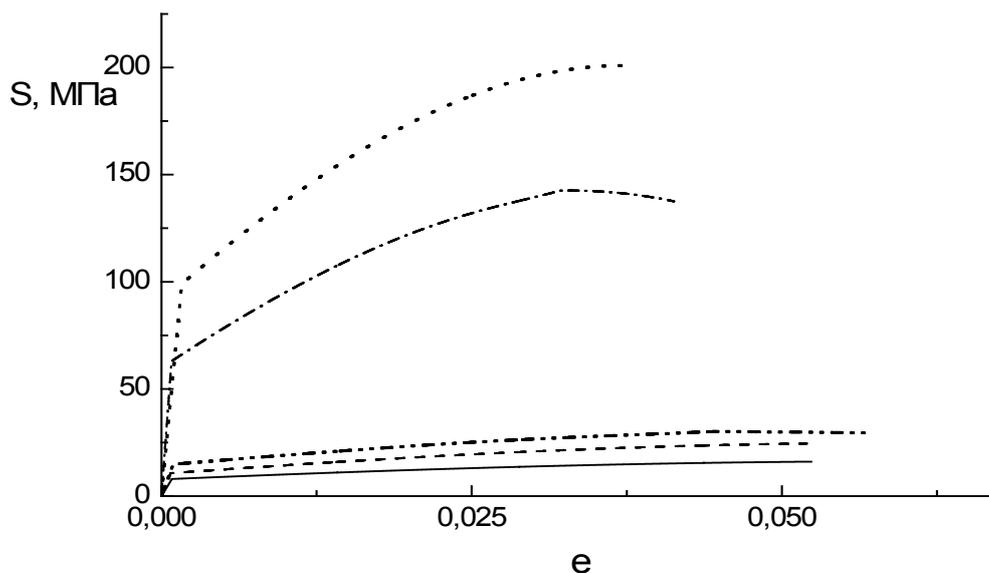


Рисунок 2.11 – Диаграммы нагружения структурных компонентов
угля

При решении задачи в динамической постановке использовалась более простая модель среды: упруго-идеальнопластическая. Критерием перехода от упругого поведения среды к вязкопластическому использовалось условие текучести Мизеса с заданными значениями пределов прочности материалов при сжатии и растяжении (таблица 2.3) и предельными деформациями разрушения в соответствии с вязкопластическими свойствами ингредиентов (таблица 2.2). Эти предельные деформации варьировались для ингредиентов в диапазоне $\varepsilon^* = 0,1\% \div 1,3\%$ ($\varepsilon^* \approx 0,2/\sigma^*$, где σ^* – предел прочности соответствующего компонента в МПа, т.е. более прочные компоненты проявляют более хрупкое поведение).

Приведем расчёт механического поведения под нагрузкой представительного мезообъёма угля. Мезообъёмы угля, представленные на рисунках 2.6 и 2.7, содержат недостаточное количество структурных элементов, чтобы считаться представительными. Рассматривая их как элементарные гетерогенные структуры путём их трансляций можно

формировать представительные мезообъемы с выраженной, либо затушеванной слоистостью.

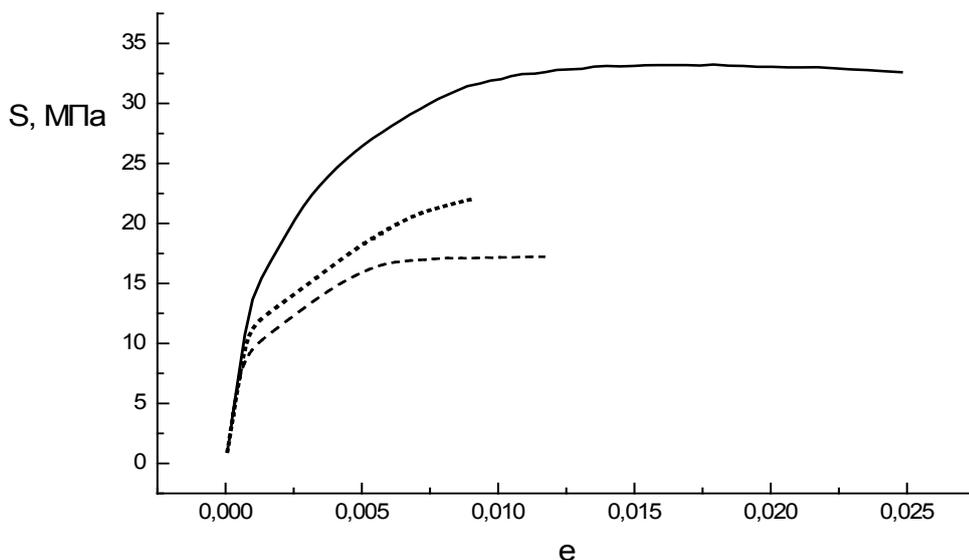


Рисунок 2.12 – Диаграммы нагружения образца угля при сжатии вдоль слоев, сдвиге вдоль слоев, диаграмма сжатия «представительного» мезообъема

Интегральный отклик мезообъема в целом позволил получить диаграмму нагружения угля данного состава (рисунок 2.12). На рисунке 2.12 показаны диаграммы сжатия вдоль слоев (верхняя кривая), сдвига (нижняя кривая) и диаграмма сжатия представительного мезообъема (средняя кривая). Так как представительный мезообъем был сформирован трансляциями и поворотами исходного таким образом, чтобы чередовались поперечные и продольные слои (9 кубиков 3×3 исходного мезообъема), то его диаграмма должна занимать промежуточное положение, что и видно на рисунке 2.12. Наклон кривой равен двум модулям сдвига (2μ) и приблизительно совпадает для всех кривых нагружения, и равен $6,7 \pm 0,3$ ГПа. Табличное значение угля неизвестного состава даёт величину 5 ГПа (таблица 2.3). Учитывая разброс экспериментальных данных по измерениям упругих модулей углей, полученное совпадение можно считать отличным.

Рассмотрим характер разрушения угля на мезоуровне и образования пылевых частиц.

Характерные мезообъёмы угля для двух случаев с порами мезоскопического масштаба (рисунок 2.6) и без пор (рисунок 2.7) с заданным процентным содержанием компонент были нагружены разными способами:

- 1) сжатием вдоль и поперёк слоёв;
- 2) сдвигом вдоль и поперёк слоёв;
- 3) комбинированным нагружением (стесненное сжатие по одной оси и двухосное сжатие);
- 4) срезом поперёк слоёв, вплоть до разрушения и образования пылевых частиц.

Обсудим результаты, полученные по квазистатической модели. Эти результаты интересны прежде всего тем, что в них учтено вязко-пластическое нелинейное поведение среды и накопление повреждений [150–152].

Большой интерес представляет нагружение беспористых образцов, т. к. в процессе их нагружения в результате накопления повреждений происходит локализация поврежденности в областях концентраторов напряжений. В результате формируется пористость деформационного происхождения. Например, на рисунках 2.13 и 2.14 ясно видны пики поврежденности, которые можно трактовать как формирующиеся несплошности.

На рисунке 2.13 показано распределение в беспористом (в расчете учитывались только относительно крупные пустоты) образце поврежденности, интенсивности деформаций и интенсивности напряжений (для двухосного сжатия, когда средняя по объему интенсивность деформаций достигла 0,3 %). Для этого варианта нагружения характерно образование довольно значительного числа локальных областей накопления повреждений вблизи границ раздела структурных элементов и пустот. Этот результат расчета можно рассматривать как этап моделирования зарождения начальной поврежденности (нечто вроде зарождения пор в изначально «совершенном», неповрежденном образце), которая при последующих циклах нагружения

приведет к тому, что мы будем иметь дело с совершенно другим, изначально поврежденным, пористым образцом.

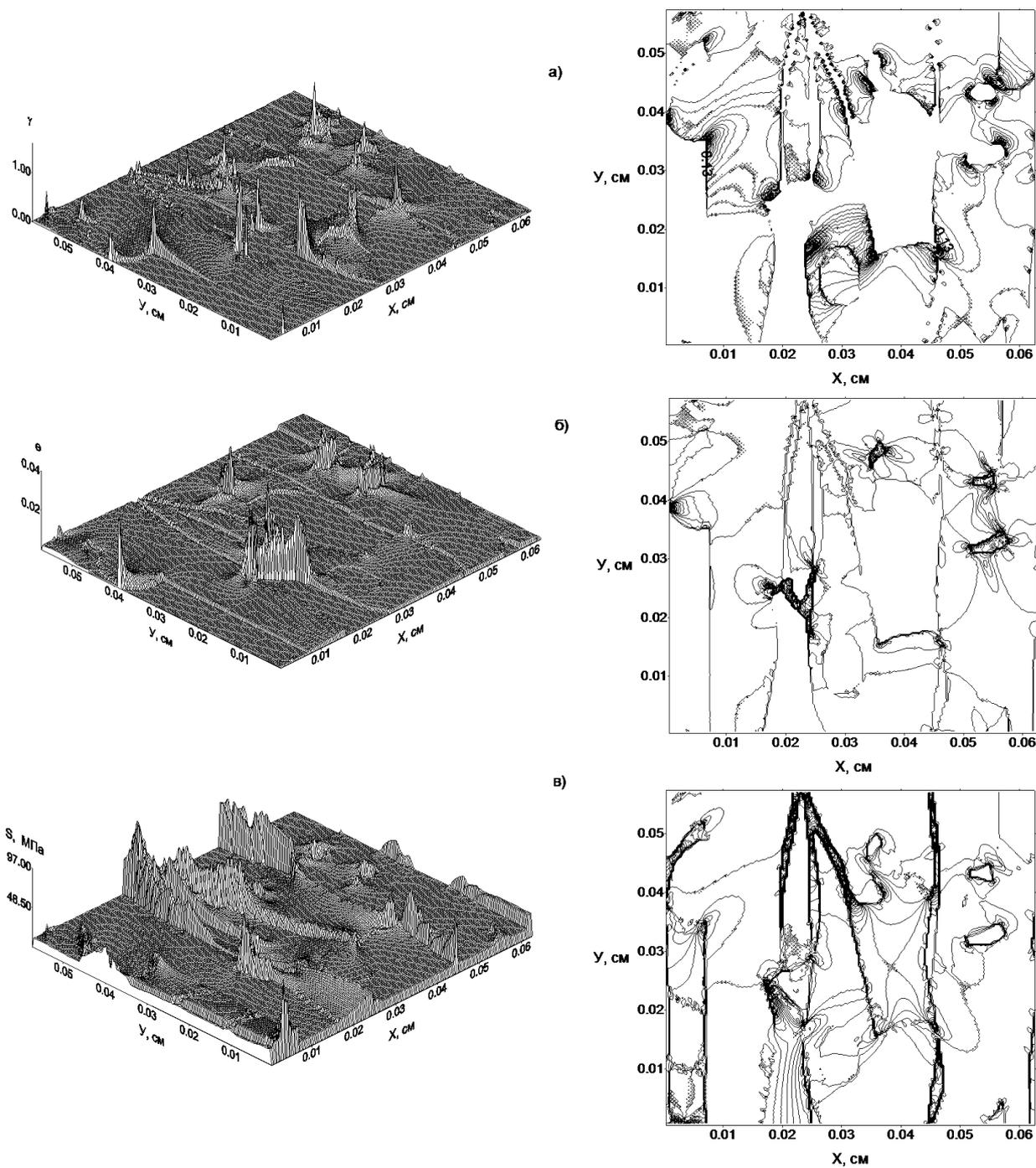


Рисунок 2.13 – Двухосное сжатие в условиях плоского напряженного состояния образца угля размером 626x574 мкм: а) параметр накопления повреждений; б) интенсивность деформаций; в) интенсивность напряжений

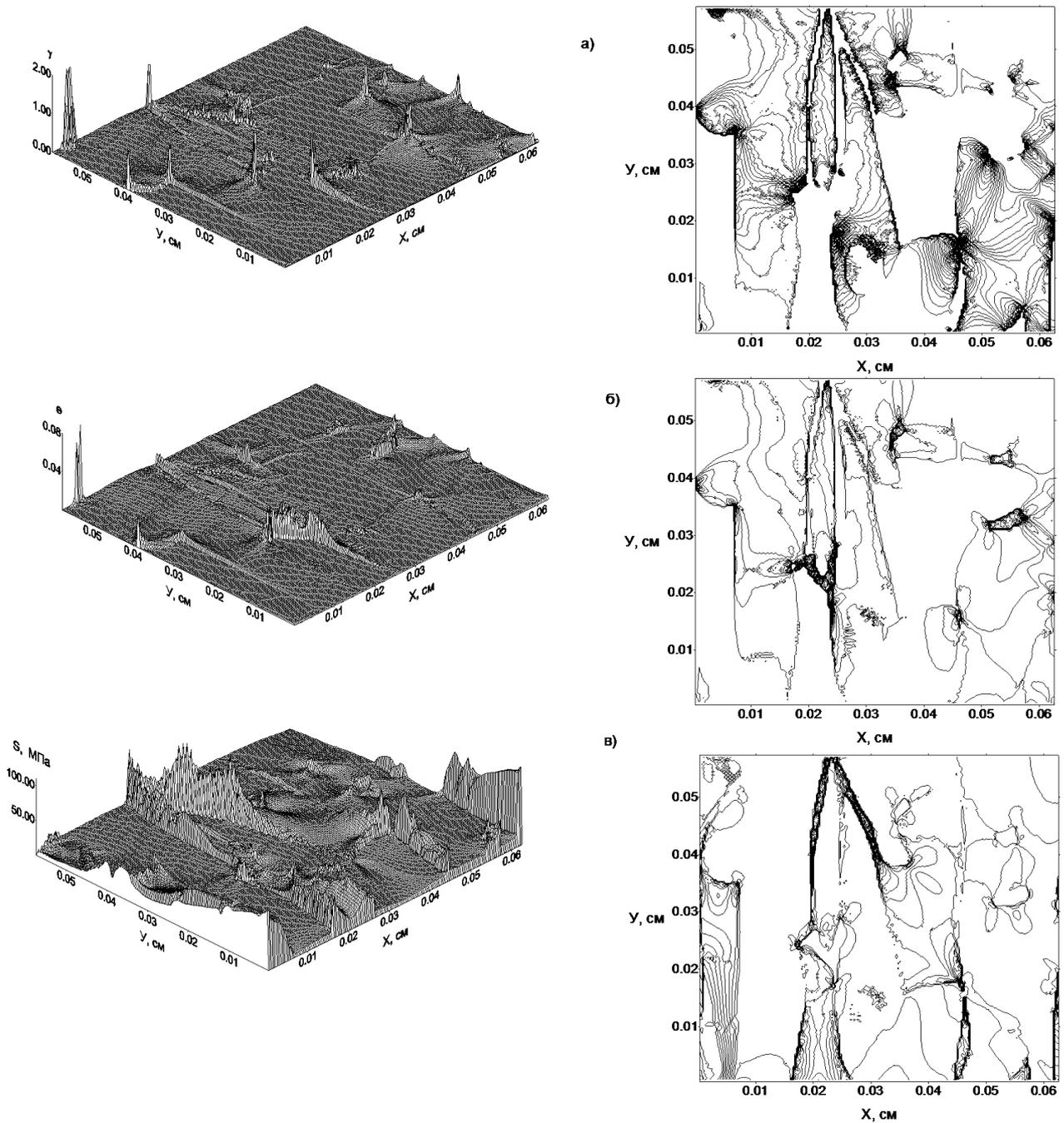


Рисунок 2.14 – Сдвиг поперек слоев (вдоль оси X, грани $Y = 0$ и $Y = 626$ мкм – свободны от нормальных напряжений, плоское напряженное состояние) образца угля размером 626×574 мкм: а) параметр накопления повреждений; б) интенсивность деформаций; в) интенсивность напряжений

При сдвиге поперек слоев (рисунок 2.14, средняя деформация сдвига 0,3 %) картина распределения качественно подобна случаю двухосного сжатия: также формируется система точечных очагов накопления повреждений.

При сжатии образца вдоль слоев (рисунок 2.15) картина деформирования и разрушения резко меняется. В образце развивается несколько магистральных трещин. Когда средняя по объему интенсивность деформаций достигает 4 %, образец оказывается разделенным на несколько «крупных» частей. Они хорошо видны как на карте изолиний для параметра поврежденности, так и на карте изолиний интенсивности деформаций. Этот расчет, в частности, показывает, что вполне оправдано использование в качестве критерия разрушения условие достижения предельных деформаций сдвига, как это и было принято в цикле динамических расчетов.

При сдвиге образца вдоль слоев (рисунок 2.15, средняя деформация сдвига 1,2 %) обширная область накопления повреждений формируется в относительно слабом слое витринита, изрезанного жесткими тонкими прослойками минеральных примесей.

Особое место занимает нагружение образца срезом (в примере, показанном на рисунке 16, приведены результаты расчета при срезе поперек слоев). Граничные условия моделировали нагружение, которое создается «лезвиями ножниц»: задавалось движение границы $X=626$ мкм, $Y<280$ мкм в отрицательном и движение границы $X=0$ мкм, $Y>294$ мкм в положительном направлении оси OY . Этот случай характерен очень сильной концентрацией поврежденности на границе нагруженных и ненагруженных частей поверхности, тогда как основной объем материала на начальных этапах нагружения деформируется относительно мало.

Решение задачи в динамической постановке привело практически к тем же результатам. При одинаковых условиях нагружения наблюдается не только качественное, но и количественное совпадение картин деформации и разрушения.

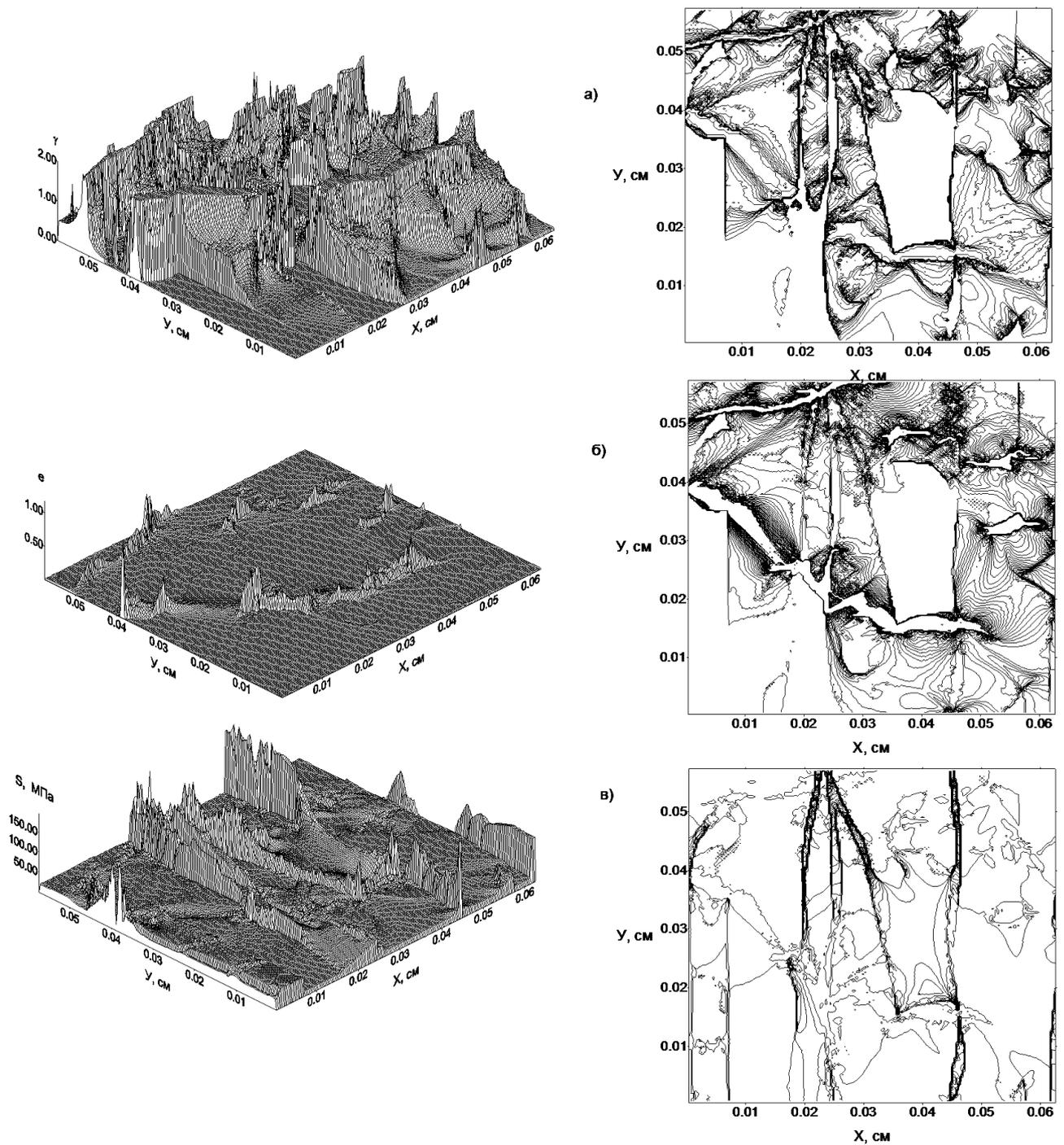


Рисунок 2.15 – Одноосное сжатие вдоль оси Y (на гранях $X = 0$ и $X = 626$ мкм – условия скольжения вдоль жесткой стенки, плоское напряженное состояние) образца угля размером 626×574 мкм: а) параметр накопления повреждений; б) интенсивность деформаций; в) интенсивность напряжений

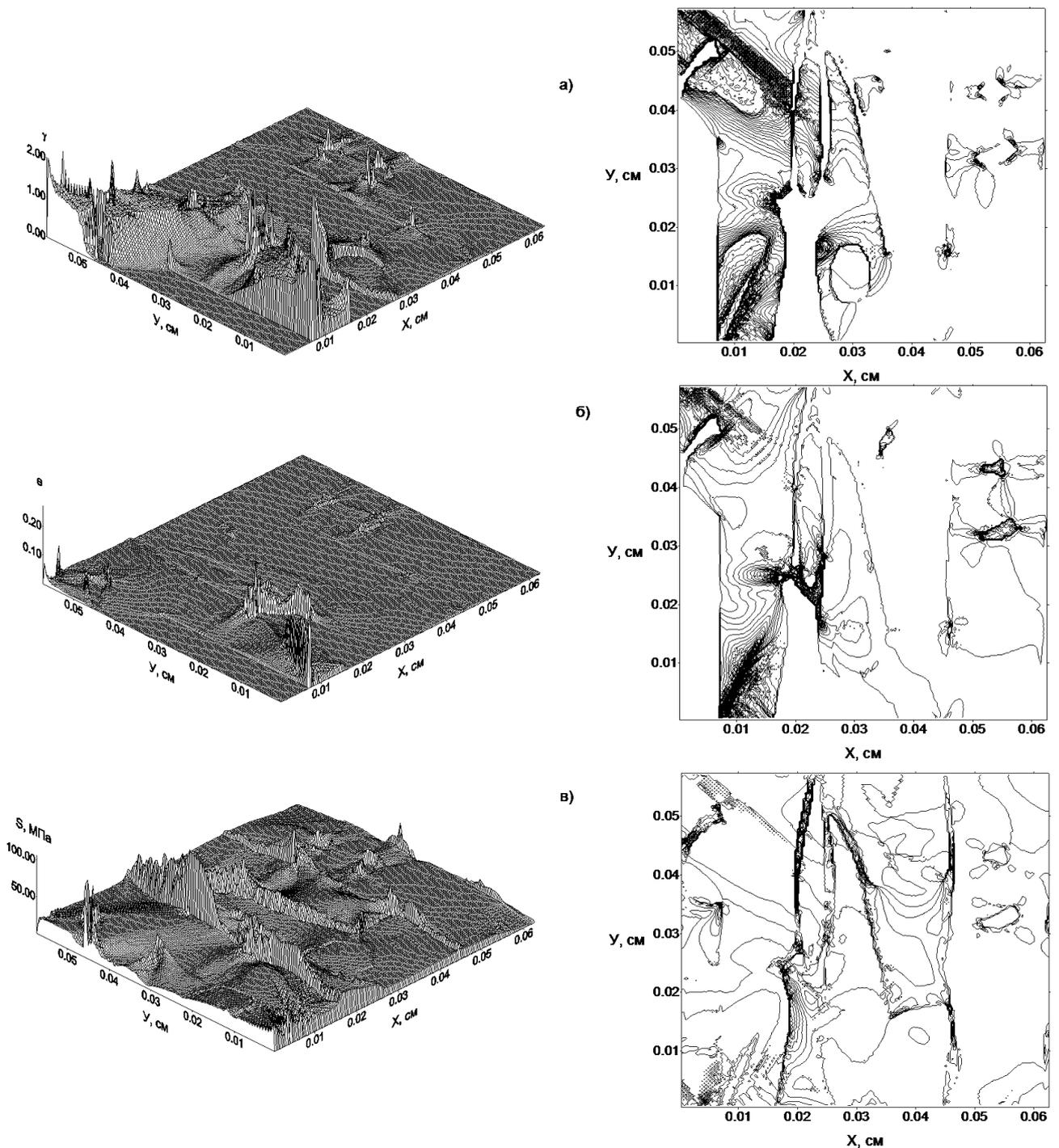


Рисунок 2.16 – Сдвиг вдоль слоев (вдоль оси Y , грани $X = 0$ и $X = 626$ мкм – свободны от нормальных напряжений, плоское напряженное состояние) образца угля размером 626×574 мкм: а) параметр накопления повреждений; б) интенсивность деформаций; в) интенсивность напряжений

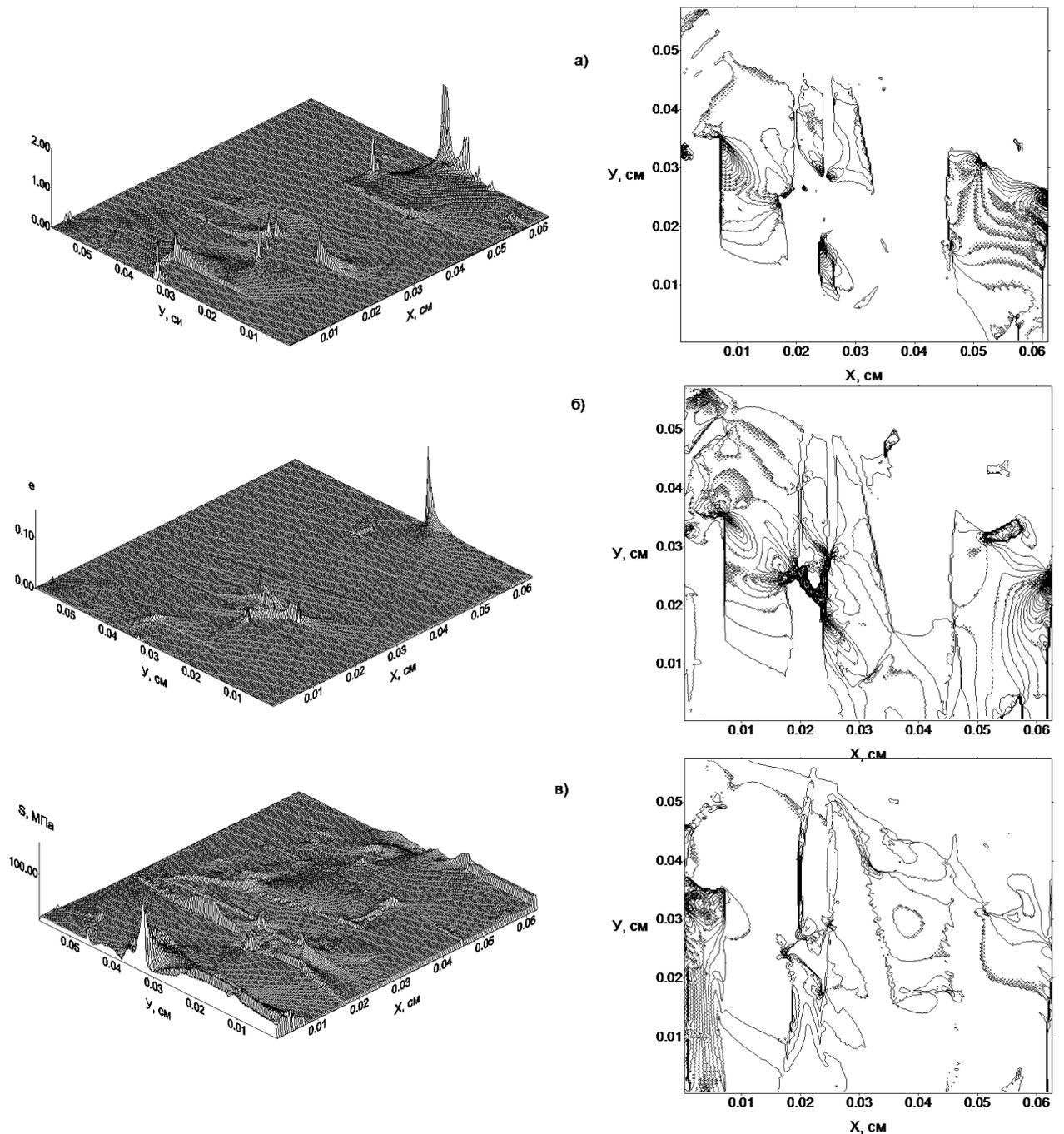


Рисунок 2.17 – Срез поперек слоев (вдоль оси X, плоское напряженное состояние) образца угля размером 626x574 мкм: а) параметр накопления повреждений; б) интенсивность деформаций; в) интенсивность напряжений

Схемы нагружения беспористого образца и области разрушенного материала показаны на рисунке 2.17. Наблюдается более выраженная локализация деформации и разрушения и больший объем полностью

разрушенного материала (с размерами частиц менее 2 мкм, черные области на рисунке 2.17).

Качественное отличие результатов наблюдается при учете исходной пористости образца (рисунок 2.18). Полностью разрушенного материала становится значительно меньше. В результате разрушения ярко выражено формирование фрагментов размерами 2–100 мкм, что дает возможность оценить распределение образующихся пылевых частиц по размерам в указанном интервале.

Картины распределений частиц по размерам для разных случаев нагружения: сжатие вдоль слоев, сжатие поперек слоев, сдвиг вдоль слоев – приведены на рисунках 2.20–2.22.

Подсчет этих частиц разных размеров осуществлялся следующим образом. Оконтуренные изолиниями поврежденности частицы накрывались кружками соответствующих размеров (светло-зеленые – 75 мкм, желтые – 50 мкм, оранжевые – 40 мкм, красные – 30 мкм, зеленые – 20, синие – 10 мкм, черные – разрушенный материал с частицами меньше расчетной ячейки, т. е. менее 2 мкм).

Соответствующие им функции распределения приведены на рисунках 2.23–2.25.

Таким образом, в работе на основании качественных и количественных данных для основных ингредиентов углей построены модели механического поведения этих структурных элементов. В них учтены упругие и вязкопластические свойства компонентов, а также накопление повреждений при нагружении и деградация механических свойств.

Было показано, что по определенным механическим характеристикам ингредиентов можно прогнозировать деформацию и разрушение угля заданного состава при различных условиях нагружения. Таким образом, построенные модели имеют прогностическую ценность.

Вид нагружения

Области разрушения и структура

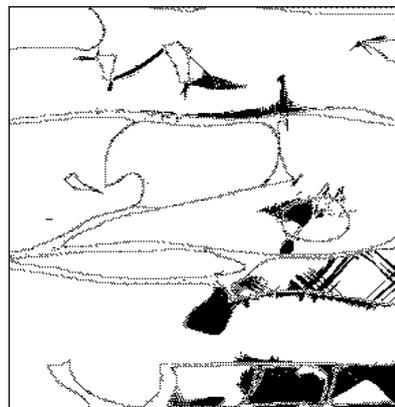
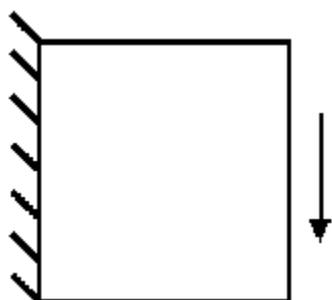
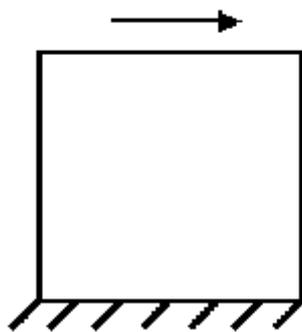
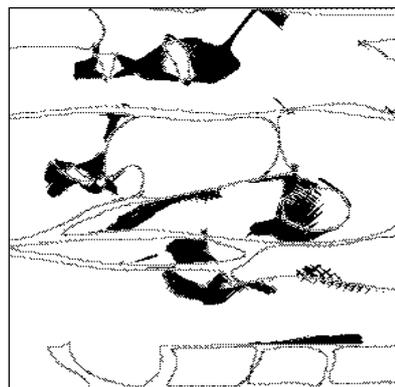
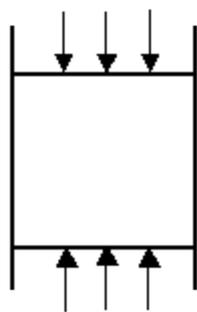
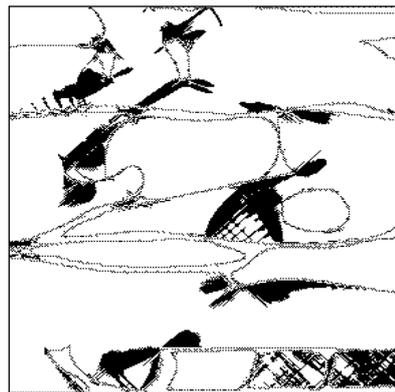
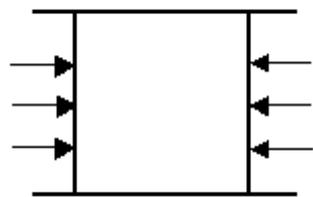


Рисунок 2.18 – Разрушение непористого образца при разных видах нагружения

Вид нагружения

Области разрушения и структура

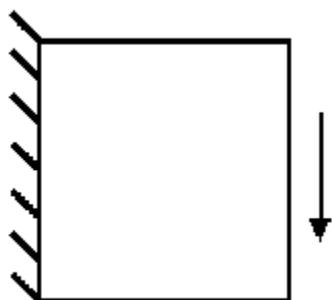
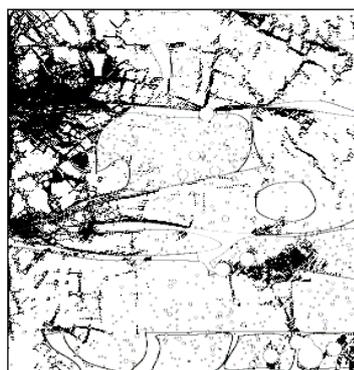
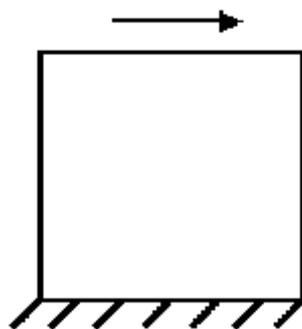
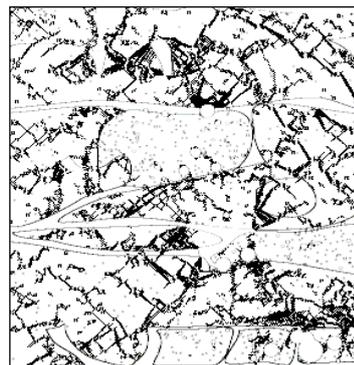
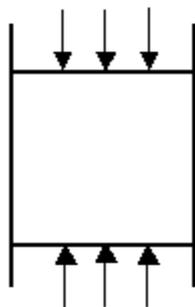
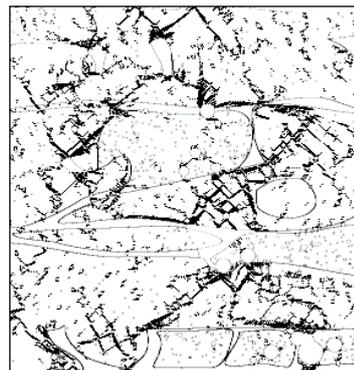
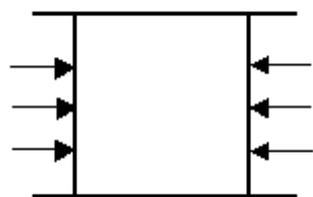


Рисунок 2.19 – Разрушение пористого образца при разных видах нагружения

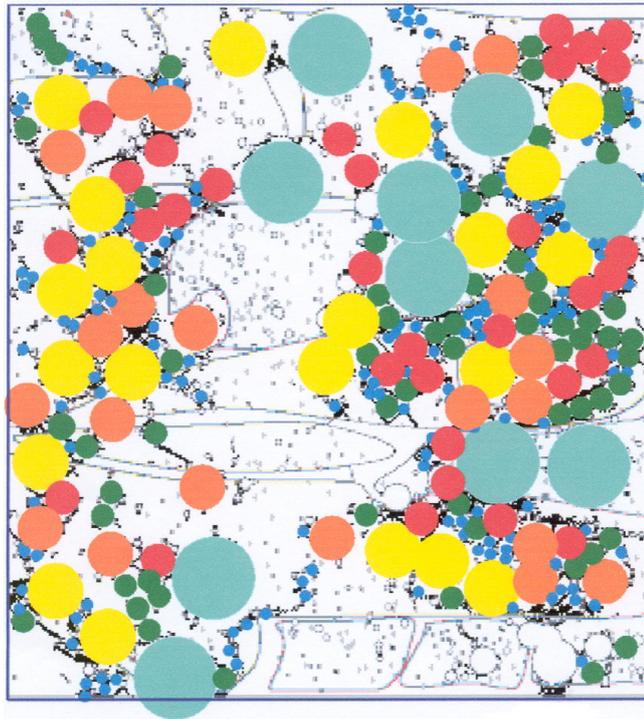


Рисунок 2.20 – Распределение пылевых частиц в угле с порами при нагружении жатием вдоль слоев

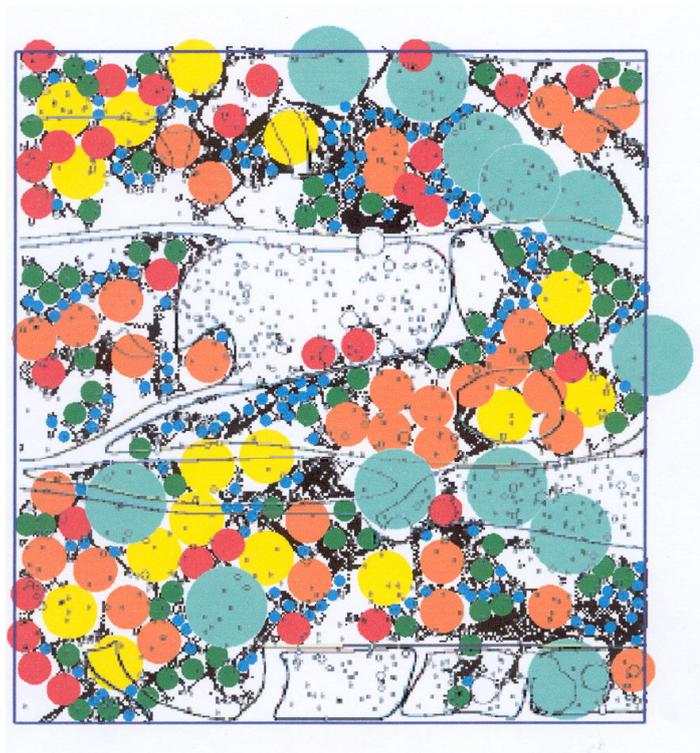


Рисунок 2.21 – Распределение пылевых частиц в угле с порами при нагружении сжатием поперек слоев

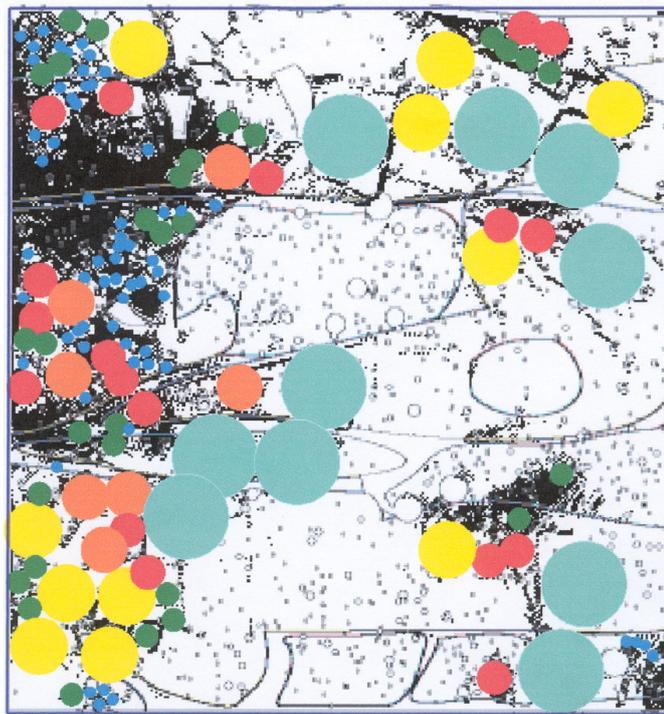


Рисунок 2.22 – Распределение пылевых частиц в угле с порами при нагружении сдвигом вдоль слоев

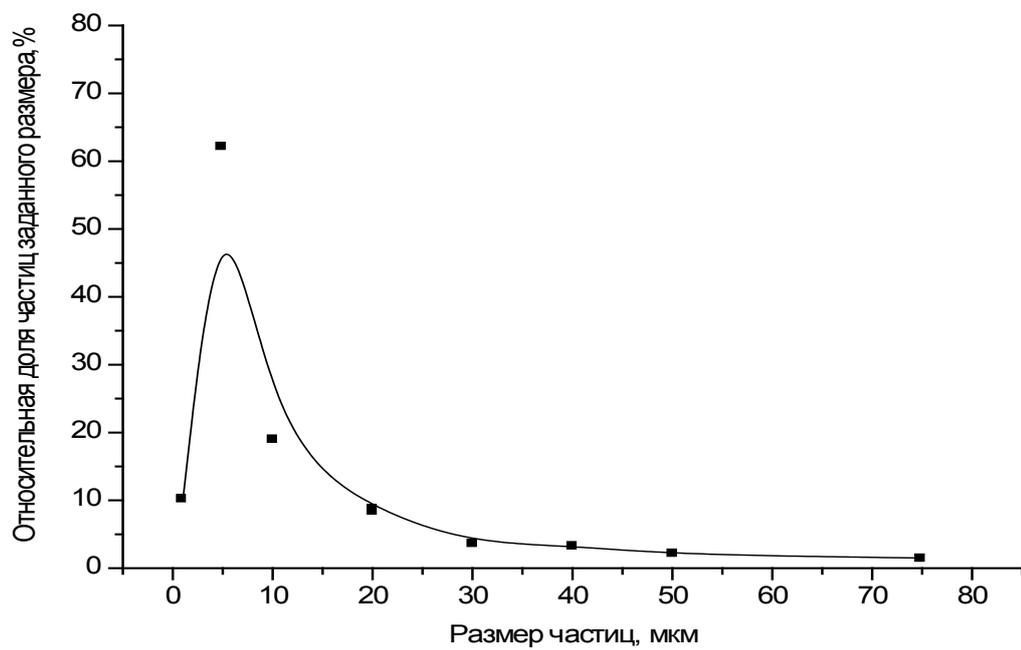


Рисунок 2.23 – Распределение пылевых частиц по размерам при разрушении в условиях сжатия поперек слоев

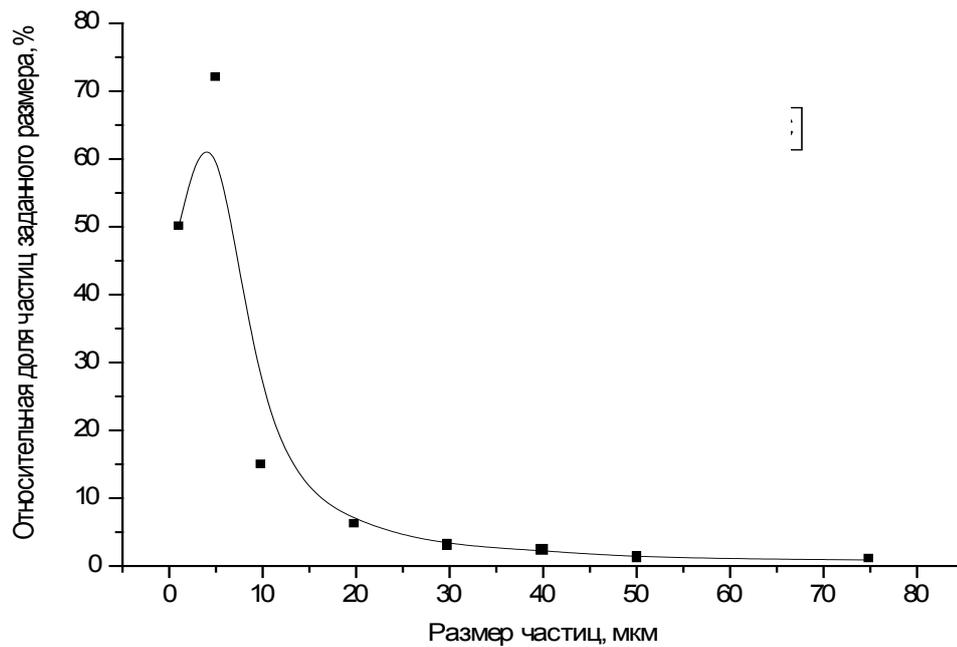


Рисунок 2.24 – Распределение пылевых частиц по размерам при разрушении в условиях сжатия вдоль слоев

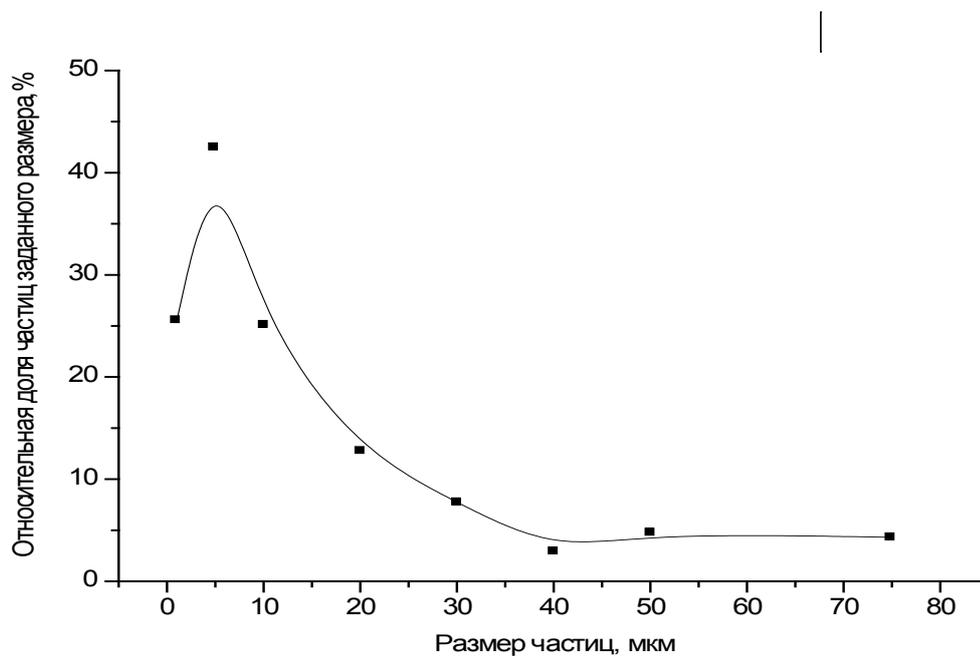


Рисунок 2.25 – Распределение пылевых частиц по размерам при разрушении в условиях сдвига вдоль слоев

Для образца угля заданного состава рассчитано распределение пылевых частиц по размерам в диапазоне 2–100 мкм. Эти распределения качественно совпадают с экспериментальными данными. Для реальных углей поровое пространство имеет упорядоченную, иерархически организованную структуру распределения пор, формирующую несколько уровней сорбционных частиц. Подобная исходная упорядоченность поровых каналов существенно влияет на вид распределения пылевых частиц. В выполненных расчетах поры распределялись случайным образом. Именно такой стохастической организации порового пространства и соответствуют расчетные функции распределения пылевых частиц по размерам.

В дальнейшем теоретические расчеты были подтверждены проведен комплексом экспериментальных исследований опубликованных в ряде работ [153, 154].

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 2.26. На рисунке хорошо виден пик в районе диаметров 10–12 мкм.

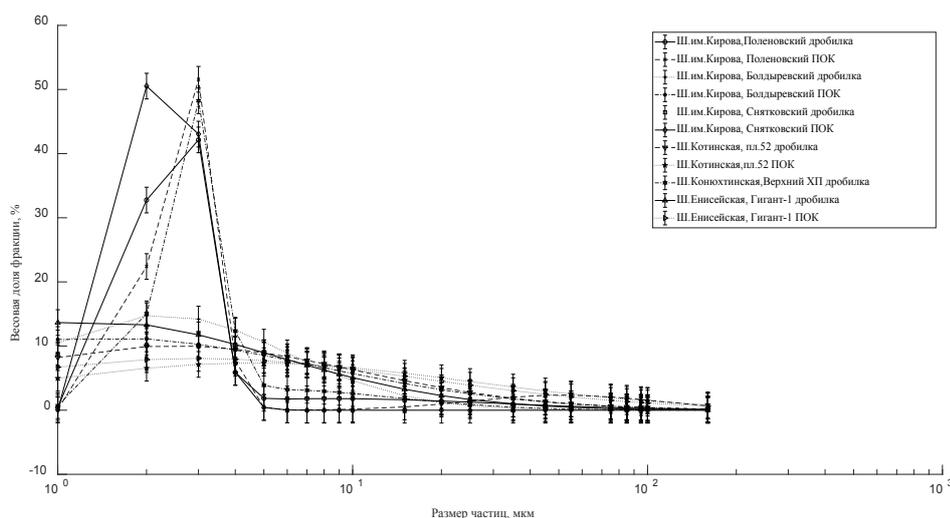


Рисунок 2.26 – Результаты ситового и седиментационного анализа образцов угля при различных способах разрушения с максимальным размером частиц 1000 мкм

Как следует из графиков, полученных 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 можно отметить, 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 выбранного 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, а также в системах распределённых вычислений и облачных суперкомпьютерах позволит обеспечить требуемые мощности для проведения математического моделирования. Вместе с тем, для корректной трехмерной математической модели требуется новые фактические данные об объемной структуре угля.

2.2. Изучение объемной структуры каменных углей с использованием рентгеновской томографии

Для изучения объемной структуры каменных углей было решено использовать возможности рентгеновской томографии, позволяющей получить объемное изображение образца горной породы, которое содержит значительно больше информации об особенностях структуры этого образца, позволяет более детально изучать, среди прочего, геометрию пустотного пространства (поры, каверны, трещины) [156–159].

Изучение объемной структурой угля и установление даже приблизительной взаимосвязи между структурой угля и такими его

свойствами как пылеобразование (метаноемкость, самовозгораемость и т. п.) представляют, как научный, так и практический интерес в части обеспечения безопасности работ в угольных шахтах.

2.2.1. Томограф. Краткое описание экспериментальной установки

Для изучения различных образцов углей использовался микрофокусный рентгеновский томограф TOLMI–150–10, разработанный в Международной лаборатории неразрушающего контроля Томского политехнического университета.

Основные технические характеристики установки приведены в таблице 2.5, устройство – на рисунке 2.27.

Таблица 2.5 – Технические характеристики TOLMI–150–10 [123]

Название характеристики	Значение
Тип матрицы	КМОП
Разрядность матрицы, бит	12
Размер матрицы, пикселей	1024 x 1000
Размер активной зоны матрицы, мм	98,6 x 96,1
Размер пикселя матрицы, мкм	96
Размер фокусного пятна рентгеновской трубки, мкм	10
Диапазон регулирования напряжения трубки, кВ	40–150
Ток трубки, мкА	100
Диапазон оптического увеличения проекции объекта	1,5–10
Диапазон размеров объекта исследования, мм	5–60

Томограф TOLMI–150–10 реализует распространённую схему сканирования с вращением исследуемого образца и регистрацией на матричный детектор конического пучка излучения. Для обеспечения вращения и позиционирования исследуемого образца использовались специальные механические устройства.

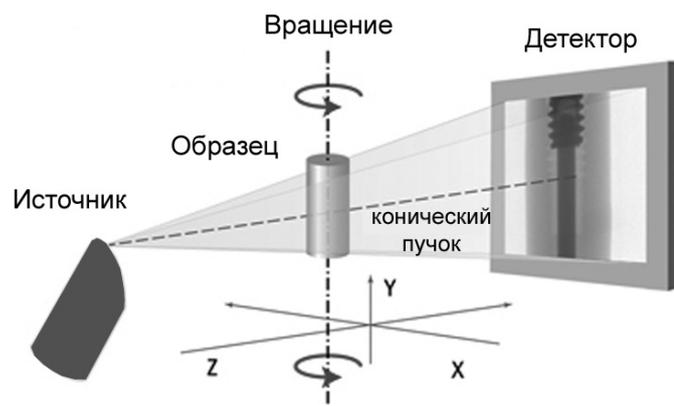


Рисунок 2.27 – Схема сканирования коническим пучком

Размер пикселя детектора и возможность оптического увеличения обеспечивают пространственное разрешение порядка 18–20 мкм.

2.2.2. Исследование пористой структуры углей и фрактальная размерность «облаков» пор

Для более четкой визуализации микропористой структуры использовался общепринятый метод [158] - образцы углей (10-40 мм) пропитывались насыщенным водным раствором рентгеноконтрастного вещества (BaI_2) со смачивателем, при этом образцы кипятились в течение одного часа при атмосферном давлении.

В соответствии с общепринятым подходом [158] для повышения чувствительности метода образцы углей (10–40 мм) пропитывались насыщенным водным раствором рентгеноконтрастного вещества (BaI_2) с добавлением смачивателя.

Были опробовано два метода введения рентгеноконтрастного вещества.

В первом случае образцы кипятились в течении одного часа при атмосферном давлении.

Во втором случае образцы угля вакуумировались (форвакуум) в стеклянном сосуде в течении одного часа, затем в сосуд подавался насыщенный водный раствор рентгеноконтрастного вещества (BaI_2). В

течении одного часа осуществлялось "холодное кипячение" образцов, под вакуумом (для удаления воздуха из раствора), затем образцы оставались в растворе на сутки при атмосферном давлении.

Исследования образцов приводились до и после пропитки рентгеноконтрастным веществом.

Прямыми экспериментами было установлено:

– образцы в естественном состоянии не позволяют получить качественные томографические снимки;

– кипячении образцов углей в водном растворе иодида бария дает более яркие томографические снимки, чем при пропитке образцов под вакуумом.

На первом этапе исследований месту отбора проб не придавалось особого значения, поскольку, как известно из практики, в пределах одного угольного пласта можно получить образцы углей с самыми различными характеристиками.

В качестве примера возможностей томографического метода на рис. 2.28 представлен плоский срез томограммы угля марки Г.

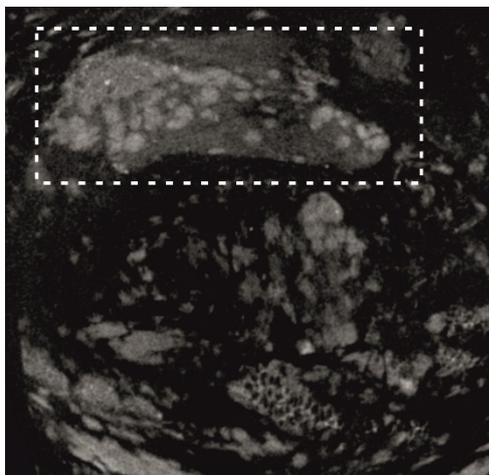


Рисунок 2.28 – Срез томограммы угля марки «Г» с рентгеноконтрастным веществом. Пунктиром выделено одно «облако» пористой структуры

Как и следовало ожидать [158, 159] система пор локализуется в структуре угля в виде неких образований, которые с некой долей условности можно назвать «облаками». Следует отметить, что чем светлее участок томограммы, тем выше коэффициент ослабления рентгеновского излучения и, следовательно, тем выше концентрация пор, пропитанных рентгеноконтрастным веществом.

На рисунке 2.29 приведена объемная реконструкция исследуемого образца, при этом, с целью получения качественного изображения в реконструкции использовались достаточно плотные облака – выше 60 % от максимальной интенсивности поглощения. Из рисунка видно, что "облака" системы пор вытянуты по напластованию и имеют достаточно сложную структуру.

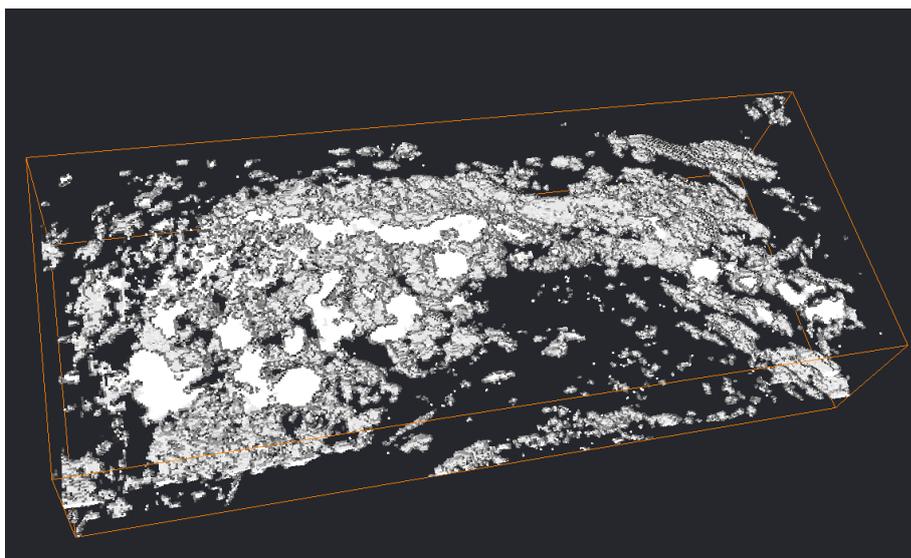


Рисунок 2.29 – 3D-визуализация «облака» пор, выделенного на рисунке 2.28

Как давно установлено, уголь имеет сложную гетерогенную структуру, и в последнее время, для описания таких гетерогенных структур успешно используются методы фрактальной геометрии [153], так в частности в работе [160] показана связь фрактальной размерности поверхности угля с его выбросоопасными характеристиками.

«Фракталами называются сложные геометрические объекты: линии, поверхности, пространственные тела, имеющие сильно изрезанную форму и обладающие свойством самоподобия, обладающая свойством самоподобия» [161], то есть объекты, составленные из множества частей, каждая из которых подобна всей фигуре целиком. В более широком смысле под фракталами понимают множества точек в евклидовом пространстве, имеющие дробную размерность D , либо метрическую размерность, отличную от топологической [154]. Фрактальная размерность D является количественной характеристикой самоподобия, т. е. указывает, каким образом нужно изменить масштаб, чтобы выбранная часть совпадала со всем множеством точек в евклидовом пространстве.

На практике при определении фрактальной размерности наиболее часто используется отношения логарифмов площади и периметра изучаемого объекта, либо соотношения логарифмов объема и поверхности для трехмерных объектов

Расчет фрактальной размерности «обабков» пористой структуры углей проводился следующим образом:

- томограмма нарезалась на слои, для которых проводился анализ с помощью математического пакета с функциями обработки изображений.
- проводилось итерационное выделение интересующих областей;
- изображения преобразовались в черно-белые, для выделения объектов и определения границ;
- проводилось определение периметра и площади каждой частицы;
- строилось графическое отображение отношения логарифмов площади и периметров, из которого и определялась фрактальная размерность.

На рисунке 30 приведен график отношения логарифмов площади и периметра «облаков» пористой структуры различной плотности, полученных в результате обработки томограммы, представленной на рисунке 2.28.

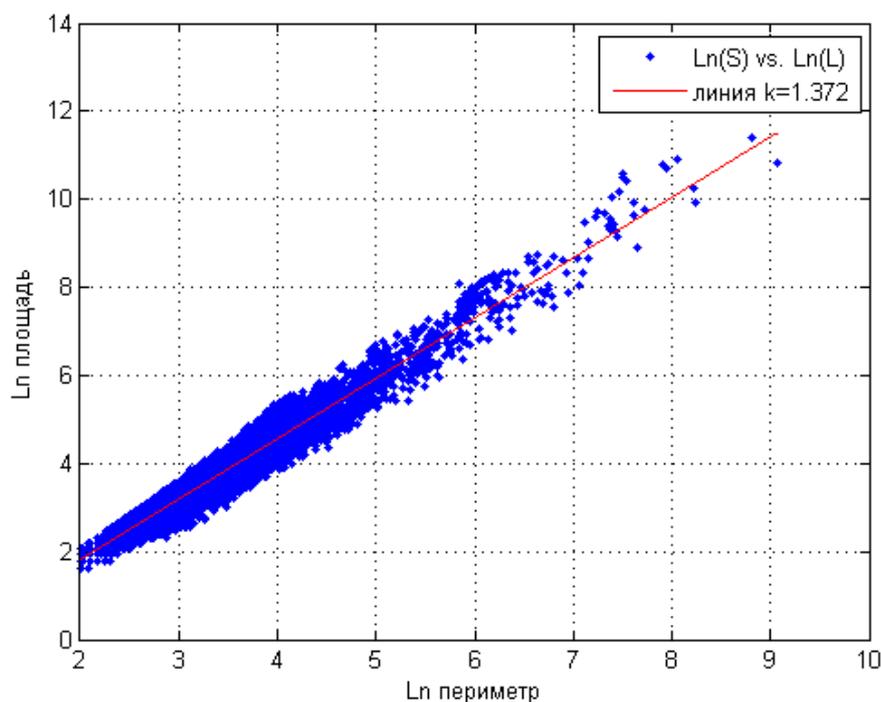


Рисунок 2.30 – Логарифмическая зависимость площади и периметра «облаков» пор для томограммы, изображенной на рисунке 2.28

Как следует из графика отношения логарифмов площади и периметра «облаков» пористой структуры является постоянным в достаточно широкой области изменения как площади, так и периметра, и равно 1.37.

Таким образом, фрактальная размерность плоского среза пористой системы равна $D = 1.37$, что соответствует объемной фрактальной размерности «облаков» пористой структуры $D = 2,37$. Далее для однообразного представления фрактальной размерности будет использоваться объемная фрактальная размерность.

В целом для 12 образцов углей различных марок установлено, что объемная фрактальная размерность пористой структуры этих углей колеблется в пределах $D = 2,3-2,4$.

Интересно, во всех исследованных образцах углей системы минеральных слоистых включений также имеют облачную структуру, причем

фрактальные размерности "облаков" минеральных включений для различных углей близки между собой и колеблются в пределах $D = 2,35-2,45$.

2.2.3. Исследование особенностей структуры углей с низкой пылеобразующей способностью

Объемная структура исследованного в работе образца «малопылящих» углей (рисунок 2.31) имеет свои отличительные особенности – минеральные включения представлены в виде распределенных по объему локальных образований, соединенных между собой системой трещин. Самовозгорающиеся угли имеют более ярко выраженную слоистую структуру, «облачная» слоистость практически отсутствует.

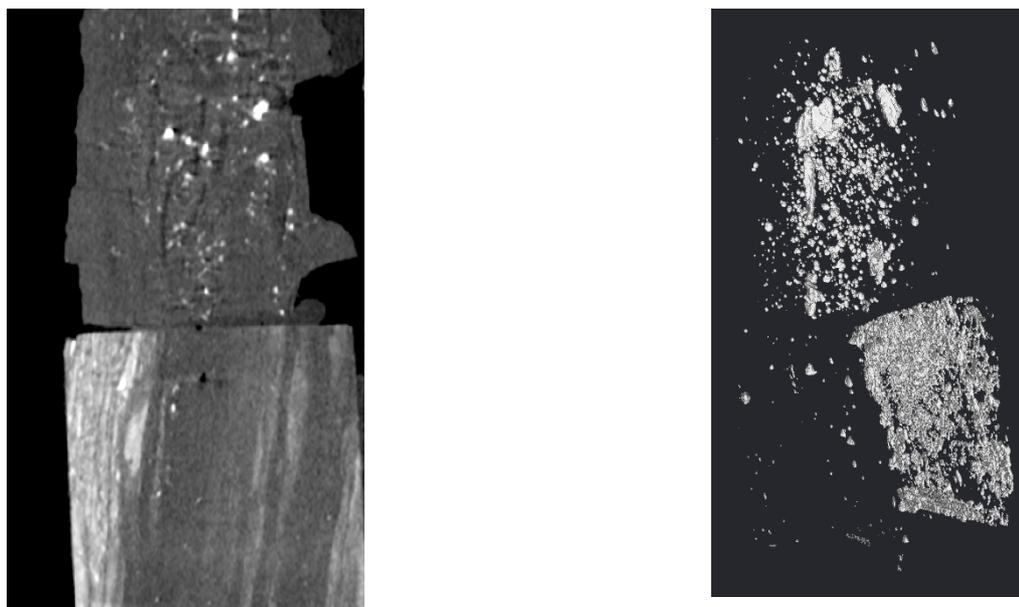


Рисунок 2.31 – Объединенные на одной томограмме два образца угля: верхний образец – «малопылящий уголь», нижний – склонный к пылеобразованию, справа 3D-визуализация данных образцов

Обращает на себя внимание тот факт, что системы трещин «малопылящих» углей имеют схожие между собой объемные структуры – трещины идут от одного минерального включения (концентратора напряжений) до другого, тогда как у «слоистых», трещины расположены параллельно напластованию или «гаснут» на минеральных прослойках.

Взаимосвязь между показанной внутренней структурой «малопылящих» углей и количеством выделяющейся пыли при разрушении нельзя считать доказанной, так как мала статистика. Однако следует отметить, что полученные результаты согласуются с современными представлениями о механизме разрушения гетерогенных структур [153, 162].

2.2.4. Связь между внутренней фрактальной структурой неразрушенного угля и фрактальными размерностями продуктов механического разрушения угля

Данная часть работы посвящена установлению связи между внутренней фрактальной структурой не разрушенного и угля фрактальными размерностями продуктов механического разрушения угля.

В связи с тем, что после получения томограммы образца угля этот образец подвергался разрушению, то пропитка рентгеноконтрастным веществом образцов угля не проводилась, поскольку эта пропитка привела бы к изменению прочностных свойств угля и искажению результатов разрушения.

В первом исследовании [163] объект помещали на вращающийся столик при неподвижных детекторе и рентгеновском излучателе. В данном исследовании применен другой принцип построения срезов для воссоздания трехмерной картины распределения коэффициента ослабления. В применяемом медицинском компьютерном томографе GE LightSpeed VCT образец находится на горизонтальном транспортёре перемещающемся внутри вращающегося блока содержащего излучатель. Спиральное сканирование заключается в одновременном выполнении двух процедур: поступательного движения транспортера при одновременным непрерывном вращение блока с излучателем – в этом случае блок излучателя описывает спираль вокруг исследуемого образца. В используемом томографе строятся одновременно несколько спиралей вокруг объекта исследований, что после математической

обработки позволяет увеличить пространственное разрешение томограмм и улучшить контрастное разрешение.

Основной показатель получаемый при проведении томографирования это ЛКО – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения. Эта величина определяется химическим составом и плотностью вещества для выбранной энергии рентгеновского излучения. Различия в значениях ЛКО для минералов позволяет изучать внутреннюю структура образцов без специальной подготовки и без разрушения. Значения ЛКО полученные для каждой точки (вокселя) томограммы сравниваются с теоретическими эталонными значениями и позволяют сделать предположения о составе и плотности вещества образца.

Изображения получаемый при томографировании объекта являются черно-белыми с градациями серого, где для каждого уровня яркости на томограмме ставится в соответствие определённый уровень рентгеновской плотности (радиоденсивности). Данное соотношение между яркостью и ослаблением рентгеновского излучения называется шкалой Хаунсфилда. Стандартные точки для шкалы Хаунсфилда (таблица 2.6) выбраны для применения в томографии живых организмов, но они применимы и для томографирования и других объектов. После проведения томографирования возможно провести сопоставление различных участков с одинаковой радиоденсивностью определённому цвету и получить более наглядное изображения распределения плотностей внутри образца.

Таблица 2.6 – Стандартные точки шкалы Хаунсфилда

Вещество	Шкала Хаунсфилда, HU	Плотность, кг/м ³
Воздух	-1000	1,27
Вода	0	1000
Кости	1000 (700–3000)	2000

Достоинством томографирования является отсутствие специальных процедур для подготовки образца, так как томографическое исследование не

предъявляет никаких специальных требований к виду образца и его внутренней структуре, это позволяет исследовать образцы без внесения искусственных изменений в исследуемый образец.

Для проведения томографирования образцов была создана сборка из 7 образцов с нескольких шахт Кузбасса. Образцы угля были соединены между собой с помощью этиленвинилацетата в единую сборку и покрыты сверху полиэтиленовой пленкой для обеспечения неподвижности внутри томографа. В дальнейшем, перед проведением количественных исследований, математическими методами, с использованием данных о плотности и физическом расположении, с томограммы были удалены области содержащие этиленвинилацетат и укрывной материал, а также элементы поддержки образцов угля, являющиеся составными частями томографа.

При получении томограмм угля был использован режим, обеспечивающий максимальное разрешение для данного томографа. По результатам сканирования разрешение составило по осям «X» и «Y» 390 мкм (оси перпендикулярные движению образца внутри томографа), по оси «Z» 625 мкм (ось движения транспортера внутри томографа). На рисунке 2.32 приведен срез сборки образцов угля помещенный в томограф.

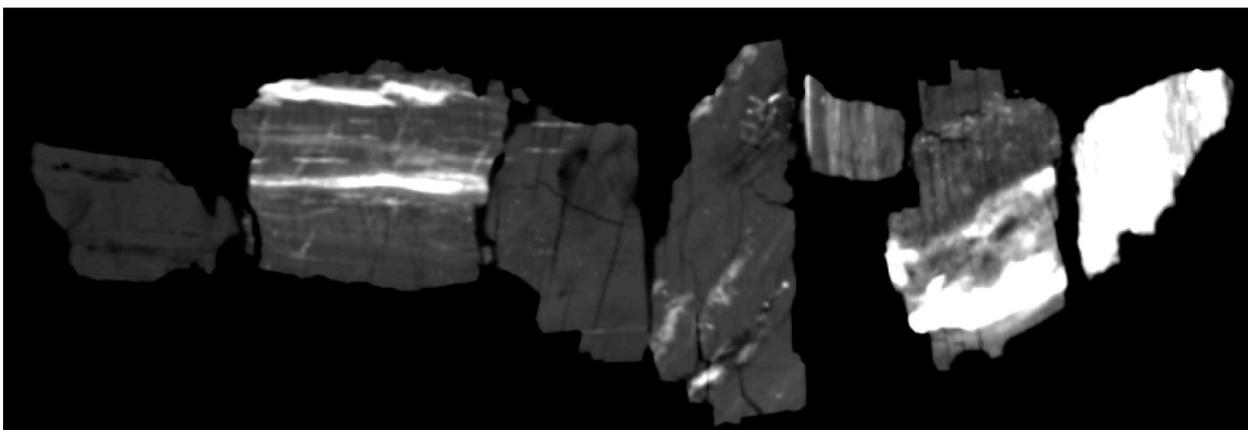


Рисунок 2.32 – Сечение томограммы перпендикулярно оси «Х» сборки образцов углей. Образцы в порядке следования слева направо: (1) ш. «Полысаевская», пл. Толмачевский (48); (2) ш. «Костромовская», пл. 19Ж; (3) ш. «Кыргайская», пл. Кыргайский (38); (4) ш. «7 Ноября», пл. Надбайкаимский; (5) ш. «Распадская-Коксовая», пл. VI; (6) ш. «Есаульская», пл. 26а; (7) ш. «Распадская-Коксовая», пл. IV-V. Более яркие области соответствуют областям с более высокой плотностью

После проведения сканирования в томографе данные о распределении радиоденсивности внутри образца измеренные по шкале Хаунсфилда были подвергнуты дополнительной обработке. Принимая во внимание, что на отрезке плотностей 0,5–1,9 значение радиоденсивности существенно линейно зависит от плотности материала образца, и в наших образцах не существует вкраплений значительно отличающихся по плотностям и по радиоденсивности, мы можем оценить значения плотности для каждого элемента томограммы. Также получая данные о наличии или отсутствии вещества, а под отсутствием вещества мы принимаем значение радиоденсивности соответствующее радиоденсивности воздуха ($HU = -1000$), возможно оценить объем исследуемого образца и его массу.

На рисунке 2.33 в качестве примера приведена карта распределения плотностей на одном из срезов томограммы образца с ш. Костромовская, пл. 19.

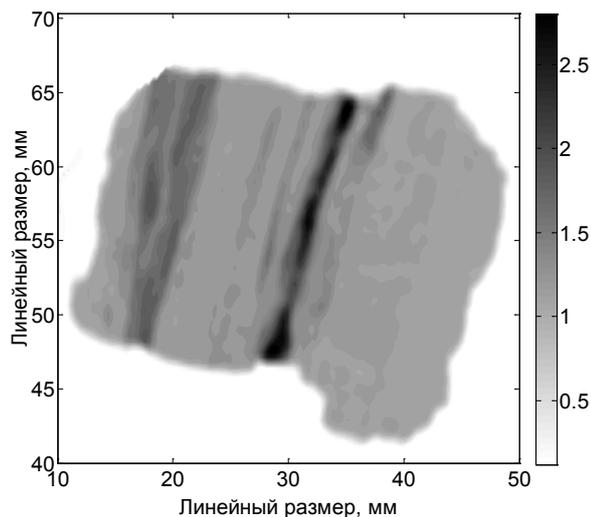


Рисунок 2.33 – Карта распределения плотностей на срезе томограммы. Инверсное изображение. Более темные области имеют более высокую плотность

Воспользовавшись данными о распределении плотности вещества по объему образцов возможно рассчитать относительное количество вещества с заданной плотностью.

На рисунке 2.34 приведены распределения относительной доли массы по плотностям для трех образцов исследуемых углей. Высокая плотность образца ш. «Распадская-Коксовая», пл. IV-V свидетельствует о наличии в нем значительной доли минеральных примесей.

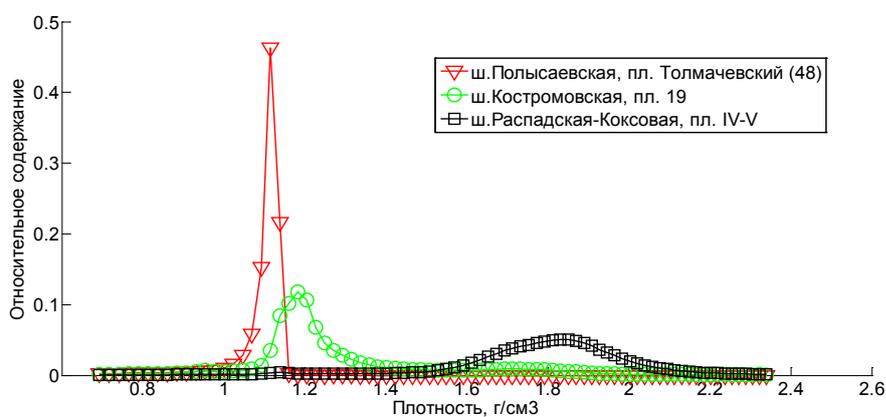


Рисунок 2.34 – Распределение относительной доли массы по ПЛОТНОСТЯМ

Поскольку плотности образцов, измеренные по шкале Хаунсфилда (это специфика обработки результатов исследований на медицинском томографе GE LightSpeed VCT), дают заниженные результаты плотности, что в рамках данного исследования не имеет принципиального значения, в дальнейшем планируется более детальное изучение взаимосвязи плотностей, полученных при помощи томографии и определенных традиционными способами.

На следующих реконструкциях трехмерных изображений показаны возможности работы с областями различной плотности, выделены области с различной радиоденсивностью, а соответственно и плотностью. На первой реконструкции с отображением плотностей от $0,02 \text{ г/см}^3$ можно различить укрывной материал образцов, а также состав, которым были склеены образцы между собой, далее изменяя диапазон плотностей можно выделить только фрагменты которые наиболее интересны для исследований. На следующих томограммах выделяются различные области исследуемых образцов, хорошо видны очертания вкраплений областей с более высокой плотностью, наслоения. Светлые области соответствуют более высокой плотности.

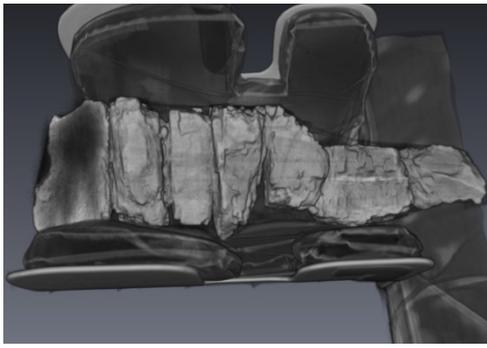


Рисунок 2.35 – Трехмерная реконструкция промежутка плотностей от $0,02 \text{ г/см}^3$ до $0,99 \text{ г/см}^3$

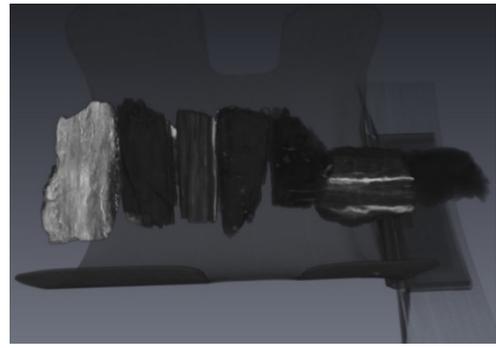


Рисунок 2.36 – Трехмерная реконструкция промежутка плотностей от $1,00 \text{ г/см}^3$ до $2,28 \text{ г/см}^3$

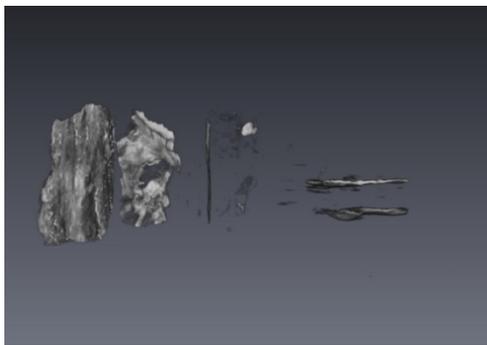


Рисунок 2.37 – Трехмерная реконструкция промежутка плотностей от $1,44 \text{ г/см}^3$ до $2,28 \text{ г/см}^3$

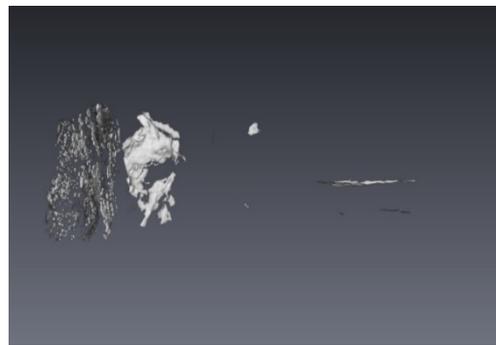


Рисунок 2.38 – Трехмерная реконструкция промежутка плотностей от $2,00 \text{ г/см}^3$ до $2,28 \text{ г/см}^3$

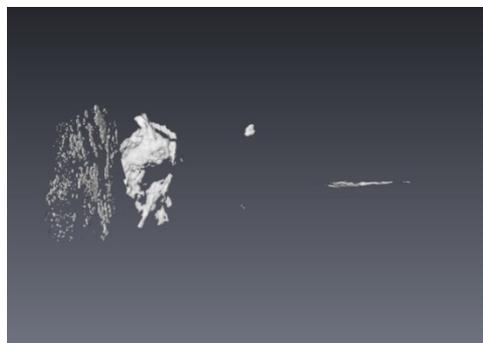


Рисунок 2.39 – Трехмерная реконструкция промежутка плотностей от $2,14 \text{ г/см}^3$ до $2,28 \text{ г/см}^3$

Для полученных срезов томограммы была рассчитана фрактальная размерность «облаков» с различной плотностью. Компьютерная программа выделяла в каждом срезе образца области с заданной плотностью (пример на рисунке 2) и рассчитывала для них фрактальную размерность, используя отношение $\ln(S)/\ln(p)$ [164]. Фрактальной размерностью «облаков» для каждого образца является тангенс наклона аппроксимирующей прямой для всех областей выделенных внутри образца (рисунок 2.40.). Следует заметить, что процедура построения графика зависимости фрактальной размерности происходит от максимальных значений плотности «облаков» в сторону уменьшения плотности «облака».

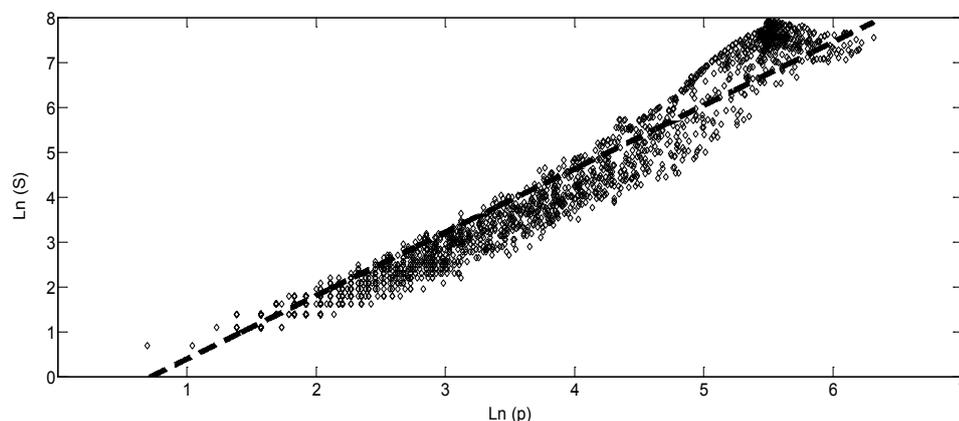


Рисунок 2.40 – Вычисление фрактальной размерности для образца ш. «Распадская-Коксовая», пл. IV-V, полученного реконструкцией томограммы

Таблица 2.7 – Фрактальные размерности «облаков плотности», рассчитанные по данным томограмм

1	Название образца	Вдоль напластования	Поперек напластования
1	ш. «Полысаевская», пл. Толмачевский (Талдинская-Южная, пл. 48)	2,50–2,51	2,58
2	ш. «Костромовская», пл. 19	2,28–2,34	2,36
3	ш. «Кыргайская», пл. Кыргайский (38)	2,42–2,47	2,48
4	ш. «7 Ноября», пл. Надбайкаимский	2,38–1,46	2,49
5	ш. «Распадская-Коксовая», пл. VI	2,42–2,45	2,55

1	Название образца	Вдоль напластования	Поперек напластования
6	ш. «Есаульская», пл. 26а	2,34–2,38	2,38
7	ш. «Распадская-Коксовая», пл. IV-V	2,35–2,36	2,44

Следует отметить, что фрактальные размерности «облаков плотности» полученные при сканировании вдоль напластования, всегда меньше, чем фрактальные размерности найденные в результате сканирования поперек напластования, как это показано в таблица 2.7.

После проведения томографирования образцы были разрушены в приборе для определения крепости.

При подготовке проб для дробления каждая из них предварительно была разбита молотком. Полученные куски фракцией ~30–70 мм откладывались в сторону, кусочки фракцией ≤ 10 мм утилизировались. Затем пробы поочередно, в произвольном порядке (т. е. не согласно напластованию), помещались в стальной стакан прибора для определения крепости (ПОК – 1). С высоты 0,7 м на подготовленную пробу сбрасывалась гиля массой 3,4 кг с количеством ударов, равным 5. После раздробленная проба полностью пересыпалась в герметичный пакет. При таком количестве ударов достигается оптимальное количество остатка раздробленного угля.

На пробу № 7, ш. Распадская-Коксовая, пл. IV-V, потребовалось 8 ударов. Есть предположение, что это был не уголь, а углистый аргиллит, который имеет большую плотность и крепость.

После разрушения все частицы с размерами менее 5 мм. по одной оси были помещены в сканнер EPSON с максимальным оптическим 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 2.41 переставлены фотографии пыли после разрушения образца и бинаризации изображения.

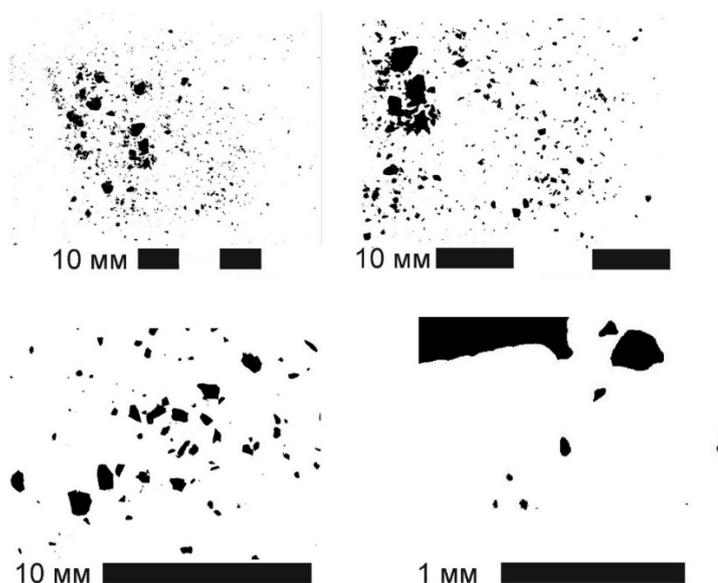


Рисунок 2.41 – Изображение частиц, полученных после разрушения образца с шахты «Полысаевская», пласта Толмачевского («Талдинская-Южная», пл. 48)

Для получения фрактальной размерности использовалась следующая методика. Предварительно изображение полученное в оттенках серого преобразовывалось в изображение содержащие только черные или белые пиксели методом Оцу [165], который выбирает порог путем минимизации различных вариантов черных и белых пикселей. На следующем шаге на черно-белом изображении выделялись области относящиеся к частицам разрушенного угля, после чего проводился подсчет количества частиц, их геометрических размеров, площади и периметра. После получения полных данных о каждой частице, строилась линейная аппроксимация отношения логарифмов периметра и площади. Тангенс угла наклона прямой аппроксимирующей данное отношение и является искомой фрактальной размерностью.

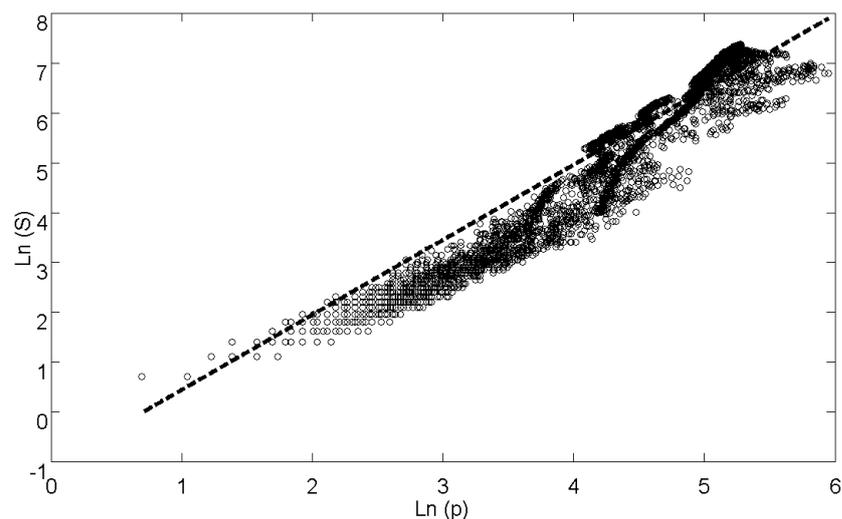


Рисунок 2.42 – Вычисление фрактальной размерности для разрушенного образца ш. «Полысаевская», пл. Толмачевского (48).

$$D = \operatorname{tg} \alpha = 1,695$$

В таблице 2.7 приведены результаты вычисления фрактальной размерности для разрушенных образцов, данные приведены для двухмерного случая, а для перехода к 3D размерностям нужно добавить единицу к размерности рассчитанной для двухмерного случая [166].

Таблица 2.8 – Фрактальные размерности для разрушенных образцов

№ №	Название образца	Обнаружено частиц	Разрешение сканера, мкм на пиксель	Фрактальная размерность (доверительный интервал для вероятности 0,95)
1	ш. «Распадская-Коксовая», пл. VI – скан 1	15 731	5,3	2,547 (2,543–2,551)
2	ш. «Распадская-Коксовая», пл. VI – скан 2	17 980	5,3	2,542 (2,538–2,545)
3	ш. «7 Ноября», пл. Надбайкаимский	15 988	5,3	2,573 (2,569–2,577)
4	ш. «Полысаевская», пл. Толмачевский («Талдинская- Южная», пл. 48)	2 246	5,3	2,695 (2,686–2,704)
5	ш. «Кыргайская», пл. Кыргайский (38)	5 199	5,3	2,651 (2,645–2,658)

№ №	Название образца	Обнаружено частиц	Разрешение сканера, мкм на пиксель	Фрактальная размерность (доверительный интервал для вероятности 0,95)
6	ш. «Распадская-Коксовая», пл. IV-V	24 854	5,3	2,575 (2,572–2,578)
7	ш. «Есаульская», пл. 26а – скан 1	15 153	5,3	2,544 (2,540–2,548)
8	ш. «Есаульская», пл. 26а – скан 2	22 055	5,3	2,58 (2,577–2,583)
9	ш. «Костромовская», пл. 19 – скан 1	20 778	5,3	2,627 (2,624–2,630)
10	ш. «Костромовская», пл. 19 – скан 2	10 761	4,1	2,629 (2,624–2,633)

Для трех образцов (строчки 1,2 и 7,8 и 9,10) были рассчитаны фрактальные размеры частиц при различной ориентации на поверхности сканера, результаты показывают, что вне зависимости от положения частиц фрактальная размерность не меняется.

Сравнение фрактальных размерностей (таблица 2.8) полученных по данным томограмм и полученных по результатам разрушения образцов показывает, что фрактальная размерность продуктов разрушения всегда выше чем фрактальная размерность «облаков» плотностей.

Таблица 2.9 – Сравнение фрактальных размерностей

№	Название образца	Фрактальная размерность вдоль напластования	Фрактальная размерность поперек напластования	Фрактальная размерность разрушенных образцов	Прирост фрактальной размерности разрушенных образцов к фрактальной размерности поперек напластования	Прирост фрактальной размерности разрушенных образцов к фрактальной размерности вдоль напластования
1	ш. «Полысаевская», пл. Толмачевский	2,505	2,58	2,69	0,11	0,185

№	Название образца	Фрактальная размерность вдоль напластования	Фрактальная размерность поперек напластования	Фрактальная размерность разрушенных образцов	Прирост фрактальной размерности разрушенных образцов к фрактальной размерности поперек напластования	Прирост фрактальной размерности разрушенных образцов к фрактальной размерности вдоль напластования
	(«Галдинская-Южная», пл. 48)					
2	ш. «Костромовская», пл. 19	2,31	2,36	2,62	0,26	0,31
3	ш. «Кыргайская», пл. Кыргызский (38)	2,435	2,48	2,65	0,17	0,215
4	ш. «7 Ноября», пл. Надбайкаимский	2,42	2,49	2,57	0,08	0,15
5	ш. «Распадская-Коксовая», пл. VI	2,435	2,55	2,54	-0,01	0,105
6	ш. «Есаульская», пл. 26а	2,36	2,38	2,6	0,22	0,24
7	ш. «Распадская-Коксовая», пл. IV-V	2,355	2,44	2,57	0,13	0,215

Таким образом, экспериментально установлено:

1. С использованием микротомографа с пространственным разрешением 0,01 мм. для различных углей пористая структура, наполненная рентгеноконтрастным веществом, имеет фрактальную структуру в виде "облаков", причем фрактальные размерности для этих углей близки между собой и колеблются в пределах $D = 2,35-2,45$.

2. На томографе GE LightSpeed VCT с пространственным разрешением 0,39–0,625 мм определено, что фрактальная размерность «облаков» с различной плотностью имеют размерность $D = 2,28-2,58$.

Таким образом, можно говорить о том, что фрактальные свойства для различных углей, колеблются в пределах $D = 2,28-2,58$ масштабах примерно от 100 мкм до 50 мм.

Таким образом при проведении математического моделирования разрушения углей, в том числе с использованием методов мезомеханики, необходимо изначально учитывать фрактальный характер его внутренней структуры с размерностью порядка $D \sim 2.5$.

В работе [167], где изучались особенности окисления каменных углей, обусловленные фрактальной геометрией угольных частиц было установлено «при размерах частиц угля от 50 мкм до 20 мм фрактальная размерность константы скорости сорбции кислорода углем $D_R \sim 2,5$ и идет объемно-поверхностное окисление». Поскольку фрактальная размерность константы скорости сорбции кислорода углем и фрактальные размерности порового пространства различных углей близки друг другу $D_R \sim D$, можно с уверенностью утверждать, что фрактальная размерность константы скорости сорбции определяется внутренней фрактальной структурой углей в диапазоне от 50 мкм до 20 мм.

Учет фрактальной структуры пористого пространства угля ($D = 2,35-2,58$) должен привести к существенному усложнению математических моделей, описывающих движение метана в угольных пластах, поскольку придется использовать уравнения в частных производных дробного порядка [168].

Однако, полученные результаты позволяют выдвинуть следующее предложение - при построении асимптотических, приближенных моделей движения метана в угле, необходимо учитывать фрактальный характер внутренней транспортной структуры углей. Например, в критерии Фурье вместо L^2 необходимо использовать $L^{2.5}$. Напомним, что критерий Фурье имеет вид:

$$F_0 = \frac{D \cdot t}{L^2}, \quad (2.19)$$

где D – коэффициент диффузии метана угля, t – характерное время изменения внешних условий, L – характерный размер тела.

Выводы по главе

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 яркий выраженный фрактальный характер с размерностью $D = 2,35–2,58$, что предъявляет дополнительные требования к математическим моделям пылеобразования при разрушения 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.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ НЕПОСРЕДСТВЕННО В ТОЧКЕ ОТБОРА ПРОБЫ

Как следует из вышесказанного, методы и приборное обеспечение контроля пылевзрывобезопасности имеют определённые недостатки, с одной стороны, но и существенный потенциал для возможного развития, с другой.

Рассмотрим и более детально проанализируем методы контроля пылевзрывобезопасности в горных выработках.

Нормативная документация допускает в случае отсутствия специальных приборов по контролю пылевзрывобезопасности горных выработок производить визуальный контроль, а также использовать лабораторно-аналитические методы контроля отобранных проб вне шахты – на поверхности.

В момент начала работы над исследованиями в данной области, основными методами пылевзрывозащиты были обеспыливание (уборка), гидропылевзрывозащита и сланцевая пылевзрывозащита. Первоначально проанализируем данные методы на предмет возможности применения их в создании методики, реализуемой в техническом устройстве.

Выработка считается пылевзрывоопасной при использовании гидропылевзрывозащиты, если во время осмотра обнаружена сухая угольная пыль или во время действия струи воздуха из насоса или груши взметывается заметное облако пыли [84, 169, 170]. В случае если требуется проводить оценку на участках с интенсивным пылетложением дополнительно применяется тест на сжатие собранной пыли и мелочи в кулаке, при этом выработка считается пылевзрывобезопасной в случае если проба легко комкуется в руке.

Данный метод наиболее прост в применении, способен выполняться неподготовленным персоналом, но не даёт количественную оценку состояния пылевзрывозащиты, соответственно не может быть использован как метод для

измерения уровня пылевзрывозащиты, а только как индикаторный метод «пелевзрывоопасна/пелевзрывобезопасна». В данном методе высок уровень влияния человеческого фактора на качество применения. Также стоит отметить, что количество шахт, в которых используется гидропылевзрывозащита, постоянно сокращается.

Следуя из вышесказанного, на данный момент считаем нецелесообразным проводить исследования по модернизации, вследствие принципиальных ограничений данного метода – низкой точности получаемых результатов.

Рассмотрим аналогичный метод, без приборного обеспечения, применяемый в выработках с использованием сланцевой взрывозащиты [84, 169].

Определение наличия отложения угольной пыли визуальным методом. Данный подход позволяет определять способность угольной пыли переходить во взвешенное состояние и достигать взрывоопасных концентраций, а также устанавливать накопление новых объемов угольной пыли на обработанных инертной пылью пылевзрывобезопасных участках горных выработок.

Метод состоит из осмотра выработки и обнаружения мест, в которых сланцевая пыль покрыта слоем угольной пыли. В данном случае используется контроль «светлое-темное», визуально определяется наличие отложений черного цвета поверх поверхностей, ранее обработанных инертной пылью. Выработка будет считаться пылевзрывоопасной, если на её поверхностях видны проступающие сквозь слой инертной пыли темные пятна угольной пыли, либо инертная пыли вообще отсутствует на поверхностях темного цвета.

К недостаткам такого метода следует отнести невозможность подтвердить фактическое состояние выработки приборным методом, а соответственно, сильное влияние человеческого фактора как со стороны работников, производящих контроль за пылевзрывозащитой, так и со стороны надзирающих органов. В общем случае нижние пределы взрываемости могут

отличаться в 3–5 раз, что создает условия, при которых визуально достаточно тонкий слой пыли, толщиной менее миллиметра, может переводить выработку в состояние недостаточной пылевзрывозащищенности. С другой стороны, само чередование слоев инертной и угольной пыли при визуальном осмотре может создать ложную уверенность о достаточном уровне пылевзрывозащиты, что может не соответствовать действительности. Так как при визуальном осмотре у специалиста нет достаточной информации о реальной частоте обработки инертной пылью выработки, о реальном пылеотложении угольной пыли, то толщина слоев инертной и угольной пыли остается вне зоны рассмотрения при принятии решения о состоянии пылевзрывобезопасности выработки. К сожалению, данным недостатком страдают все методы, анализирующие поверхностные свойства выработок и проб, отобранных в них. Данный метод невозможно рассматривать как научный и точный метод определения пылевзрывобезопасности, а только как метод, применяемый в случае невозможности применения других методов.

Очевидное развитие данного метода – это использование электронных приборов для контроля интенсивности цвета выработки или отобранной пробы, что позволит проводить оперативный анализ качества пылевзрывозащиты непосредственно в выработке. Одним из примеров такого прибора является устройство CDEM-1000 (рисунок 3.1) производства фирмы Sensidyne LP (St. Petersburg, Florida, USA). Данный прибор измеряет степень поглощения излучения оптического диапазона в смеси инертной и угольной пыли, отобранной в шахте, предварительно прибор калибруется по цвету угольной и сланцевой пыли, разница показаний возникает из-за разницы цвета инертной (более светлая) и угольной пыли (более темная). Также прибор может корректировать свои показания с учетом концентрации метана в воздухе рабочей зоны. Данные о концентрации метана вводятся вручную с использованием клавиатуры. Предназначен для ежедневного и ежесменного контроля уровня пылевзрывоопасности персоналом угольных шахт и инспекторами по контролю безопасности.

Прибор имеет индикатор, на котором индицируется слово «GREEN» в случае если выработка признана пылевзрывобезопасной и слово «RED» в случае если обработка инертной пылью недостаточна. В комплект входит стандартный набор угольной и инертной пыли для калибровки прибора.



Рисунок 3.1 – Прибор CDEM-1000

Во время исследования возможности применения данного метода на угольных шахтах России было установлено, что из-за процессов, связанных с налипанием одних частиц на другие, инертная пыль может обволакивать угольную, а также частицы угольной пыли могут быть покрыты частицами инертной пыли; из-за изменения цвета инертной пыли в процессе производства, из-за изменения отражательной способности угольной пыли различных фракций оптические датчики цвета могут выдавать неправильную информацию об истинном состоянии пылевзрывобезопасности угольной выработки. Данный метод исключительно прост в реализации, но в настоящее время существуют методологические проблемы [171] для реализации его в виде полноценного прибора. В данной работе мы не будем исследовать возможности модернизации данного метода и усовершенствования методики для реализации в виде технического устройства.

Резюмируя описание безприборных методов определения пылевзрывобезопасности горных выработок, можно сказать, что на

современном этапе развития горной промышленности, прикладных наук в области физики и электроники данный методологический подход не выдерживает никакой критики по точности и воспроизводимости результатов. А также, что немаловажно, в настоящее время не существует соответствующего метрологического обеспечения визуальных методов определения пылевзрывобезопасности. В дальнейшем, при выборе основы для разработки метода определения пылевзрывобезопасности, данный метод, на наш взгляд, не имеет перспективы для улучшения.

Следующим методом для анализа на возможность модернизации и потенциально применимым для оперативного нахождения количества инертной пыли в смесях угольной и инертной пыли в горных выработках может служить термогравиметрический метод.

В общем случае данный метод основан на регистрации изменения массы пробы вещества при воздействии на него температуры. Но методики, принятые в каждой конкретной стране, особенно касательно режимов сжигания пробы, имеют достаточно сильные различия. Так, в Японии для прокаливания смеси инертной и угольной пыли используется температура 500°C в течение 2 часов, в Польше пробу прокаливают при температуре 480°C в течение 36 часов [172]. В то же время в работах МакНИИ было показано, что полного разложения карбонатов при данных температурах не происходит, что приводит к ошибкам в определении соотношения веществ в исходной пробе, температура для прокаливания пробы должна быть не менее 950°C , чтобы полностью обеспечить разложение карбонатов.

В МакНИИ были выполнены анализы нескольких термогравиметрических методик с различными режимами сжигания образцов. Были использованы следующие режимы сжигания: температура $900\text{--}950^{\circ}\text{C}$ (режим, при котором происходит полное разложение карбонатов), температура $800\text{--}850^{\circ}\text{C}$ (режим исследования, применяемый в ВГСЧ) и температура 500°C , что соответствует режимам, используемым в Польше и Японии. Анализы проводились по следующей методике: предварительно были

подготовлены смеси инертной и угольной пыли с заранее известными составами в пределах 70–80 % по массе, угольная пыль, входящая в пробы, подготавливаемые для сжигания, бралась из 20 шахтопластов с установленной зольностью 15–45 %, сжигание проб проводилось по каждой их трех методик в соответствии с температурными режимами. В случае использования высоких температур сжигания также определялась углекислота карбонатов.

В результате проведенного исследования было установлено, что максимальная точность результатов была получена при температуре сжигания 500°C, составляя ошибку $\pm 0,25$ %, наибольшая погрешность была показана при температурах сжигания выше 800°C, что объясняется запуском химических превращений в пробе, которые связаны также с составом угольной пыли. Исследователи отмечают, что завышение показателей при высокотемпературном сжигании является следствием образования гипса во время реакции сернистого ангидрида, получающегося при сгорании серы из состава угля с оксидом кальция из разлагающихся карбонатов, а также при образовании оксида железа. К сожалению, при высокотемпературном сжигании происходит систематическое завышение количества негорючих веществ, что приводит к фактической ошибке при определении уровня пылевзрывобезопасности.

Также существует комбинация визуальной и термогравиметрической методики – предварительно визуально, методом сравнения с известным образцом, оценивается уровень негорючих веществ (наличия инертной пыли), а в лабораторию на более подробное исследование отправляются только пробы с визуально определённым содержанием горючих веществ более 10 %.

Как представляется, у данного метода есть возможный потенциал роста и возможность преобразования в методику с реализацией в виде технического устройства. Модифицированная методика, в которой за относительно небольшой промежуток времени может быть произведена реакция озоления образца пробы с подсчетом выделяемых веществ и изменения массы образца, потенциально возможна, но, к сожалению, разработка методики определения

пылевзрывобезопасности в данном направлении сопряжена с техническими ограничениями, с одной стороны, а также с методологическими и метрологическими ограничениями – с другой, что делает доработку данной методики в настоящее время экономически нецелесообразной.

Другой, прямой метод проверки смеси на взрываемость реализован в приборах ПКО-1 и ПКО-1М.

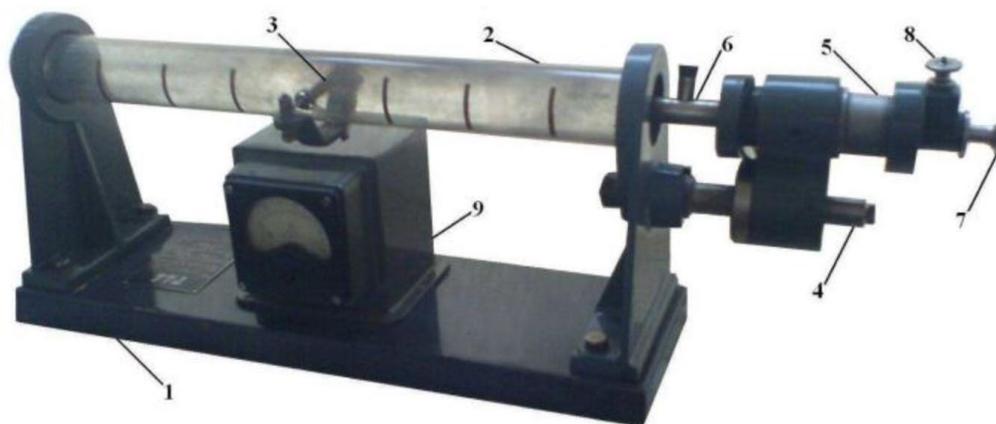


Рисунок 3.2 – Прибор ПКО-1

Общий вид прибора показан на рисунке 3.2. Принцип, использующийся при проведении эксперимента с прибором, – наблюдение результатов попадания навески пыли на спираль прибора, разогреваемую электрическим током. Прибор состоит из пластикового или металлического основания (1), с установленной на нем трубкой (2), изготовленной из тугоплавкого стекла с нанесёнными на ней делениями. Также в трубке размещена нить накаливания (3).

Одна из стоек, удерживающая стеклянную трубку, имеет механизм подачи навески угольной пыли вовнутрь стеклянной трубки. Механизм содержит направляющий стержень, на котором закреплена система распыления пробы. Система распыления пробы может отодвигаться от трубки и поворачиваться в сторону, что требуется при подготовке прибора к использованию – удалению несгоревшей пыли, а также чистки. Фиксирование распылительной системы происходит при помощи винта. Сам механизм распыления состоит из дополнительного корпуса, двух крышек, сопла (6),

емкости для помещения в нее пробы пыли и специального подающего устройства – поршня (7), приводимого в действие пружиной, и стопорного устройства (8).

Для использования прибора требуется электрическая сеть, к которой он включается через согласующее устройство, также служащее для регулировки нагрева спирали установки.

Для использования прибора первоначально следует разогреть спираль (нить накаливания) до температуры 1150°C . Контроль правильности нагрева спирали проводится по величине тока, проходящего через спираль, для этого на корпусе прибора предусмотрен амперметр (9) либо комплект ламп.

В комплект поставки прибора входят: воронка и чашка измерительная. Данная комплектация требуется для помещения испытываемой навески смеси в механизм распылительной системы.

Для проведения испытания поршень системы распыления взводится в заднее положение и фиксируется в нем стопором (должен быть установлен до щелчка). Далее используя мерную чашку и воронку из комплекта поставки, следует засыпать испытываемую пробу пыли с сопло системы распыления и плотно закрыть отверстие пробкой, входящей в комплект поставки прибора. Проконтролировать температуру спирали прибора с помощью амперметра, и в случае если температура недостаточная или избыточна, откорректировать ее с помощью автотрансформатора, увеличивая или уменьшая подводимое напряжение. Показания амперметра должны соответствовать температуре 1150°C . Так как технологические допуски позволяют изготавливать спирали с различными, но близкими, параметрами, сила тока, соответствующая температуре 1150°C , указана на бирке, закреплённой на приборе.

В случае использования прибора ПКО-1М, в котором индикация силы тока производится неоновыми лампами, следует установить регулятор трансформатора в такое положение, при котором включена только одна индикаторная лампа.

Через 30–60 секунд после установки тока соответствующей температуры для испытаний под действием пружины поршень перемещается в крайнее положение и выбрасывает навеску пыли, помещенную в механизм, на спираль.

Количество испытаний для каждой отобранной пробы – 5. Пыль в пробе признается взрывчатой, если хотя бы одно из испытаний привело к появлению пламени длиной более 0,5 деления.

Использование данного прибора возможно лишь в лабораторных условиях; потенциала для модернизации как самого прибора, так и для создания методики, позволяющей оперативно проводить проверку пылевзрывобезопасности шахт, не наблюдается.

Высокая трудоемкость, связанная с отборами большого количества проб, транспортирование отобранных проб на поверхность, обеспечение сохранности их во время транспортировки, большие затраты времени на подготовку пробы к исследованию, а также нормативная документация, которая устанавливает достаточно длинные сроки на выполнение данных исследований, полностью лишают все лабораторные методы исследования оперативности. Большая задержка во времени между моментом отбора пробы и результатами создает nepозволительную задержку для оперативного управления безопасностью шахты. Работа с открытым огнем, визуальная оценка и контроль результатов делают методику невозможной к применению во взрывоопасных условиях шахт.

Далее рассмотрим методики для определения количества инертной пыли, которые используют известные методы разделения, широко применяемые в аналитической химии. Перечислим наиболее известные из них: дефлегмация, флотация, кристаллизация, адсорбция, хроматография, дистилляция, фильтрование, экстракция, паросушение, электрофорез и т. д.

Для оценки перспективности выберем метод, в котором разделение происходит как осаждение частиц в водном растворе со специально подобранной плотностью. Далее при описании метода мы будем исходить из

того, что плотность горючих частиц угля составляет $1,4 \text{ г/см}^3$, а плотность инертной пыли – $2,2 \text{ г/см}^3$.

Сущность метода сводится к разделению отобранной смеси инертной пыли с угольной пылью в жидкости с плотностью, находящейся в промежутке между плотностями компонентов пробы. При этом частицы, содержащиеся в пробе и имеющие более высокую плотность, опускаются на дно емкости с жидкостью, а частицы с плотностью менее плотности жидкости всплывают на поверхность. После окончания движения частиц внутри ёмкости отношение между объемами частиц на дне и на поверхности может быть зафиксировано, и могут быть проведены расчёты по определению массового соотношения компонентов в отобранной пробе.

Для реализации данного метода следует определить жидкость или раствор, который по своим параметрам подходит для выполнения разделения. Самым распространённым вариантом растворителя для различных смесей является вода, которая присутствует практически везде, т. е. является доступной и безопасной с точки зрения выполнения действий методики и утилизации остатков после окончания определения соотношения компонентов. Несмотря на то, что практически все минералы тяжелее воды, в практике часто применяют водные растворы различных органических и неорганических веществ, удельный вес которых недостаточен для возникновения разделения смеси по плотности.

В условиях выполнения метода, на поверхности, например, в лаборатории одним из вариантов приготовления раствора является использование солей металлов с хорошей растворимостью в воде и высоким удельным весом. Например, это могут быть соли соляной кислоты – CaCl_2 , ZnCl_2 и т. д. Более того, используя набор растворов с различными плотностями можно разделить отобранную пробу на фракции с различными плотностями. В таблице 3.1 приведены сравнительные данные по плотностям водных растворов хлоридов, значения плотностей растворов, подчеркнутые в таблице, пригодны для приготовления растворов при выполнении методики.

Таблица 3.1 – Сравнение плотностей водных растворов хлоридов [173]

Массовая доля, %	CaCl ₂	CsCl	FeCl ₃	MgCl ₂	SrCl ₂	ZnCl ₂
0,5	1,0024	1,002	1,0025	1,0022	1,0027	1,003
1	1,0065	1,0058	1,0068	1,0062	1,0071	1,008
3	1,0232	1,0214	1,0238	1,0226	1,0252	1,026
5	1,0401	1,0374	1,0408	1,0394	1,0437	1,044
6	1,0486	1,0456	1,0493	1,0479	1,0532	1,053
9	1,0747	1,0711	1,076	1,0738	1,0825	1,081
10	1,0835	1,0798	1,0853	1,0826	1,0925	1,090
12	1,1014	1,0978	1,104	1,1005	1,1131	1,109
14	1,1198	1,1163	1,1228	1,1189	1,1342	1,128
16	1,1386	1,1355	1,142	1,1372	1,1558	1,147
18	1,1579	1,1552	1,1615	1,1553	1,178	1,166
20	1,1775	1,1756	1,1816	1,1742	1,2008	1,186
22	1,1976	1,1967		1,1938	1,2241	1,207
24	1,218	1,2185	1,2234	1,214	1,2481	1,227
25						1,238
26	1,2388	1,2411		1,2346	1,2728	1,249
28	1,26	1,2644	1,2679	1,2555	1,2983	1,270
30	1,2816	1,2885		1,2763	1,3248	1,293
32	1,3036	1,3135	1,3153		1,3523	1,316
34	1,326	1,3393			1,3811	1,340
36	1,3488	1,3661	1,3654		1,4114	1,365
38	1,372	1,3938				1,391
40	1,3957	1,4226	1,4176			1,418
42		1,4525				1,445
44		1,4835				1,474
46		1,5158				1,504
48		1,5495				1,535
50		1,5846				1,568
60		1,7868				1,749

Массовая доля, %	CaCl ₂	CsCl	FeCl ₃	MgCl ₂	SrCl ₂	ZnCl ₂
64		1,8842				1,831
70						1,962

Следует отметить, что ограничением метода разделения по плотностям в растворе является низкая скорость, а иногда и полная невозможность разделения мелких частиц, находящихся в отобранной пробе. В то же время данный метод хорошо применим к разделению частиц, получаемых в результате ситового анализа. Также большое влияние на длительность проведения разделения по данной методике влияет вязкость раствора.

Приведем последовательность действий, применяемых в данной методике для получения результата, – массового соотношения инертной и угольной пыли в пробе.

Все оборудование, применяемое в методике, при использовании его в шахтах, опасных по взрывам угольной пыли и рудничного газа, должно иметь соответствующие разрешительные документы.

Предварительно, используя полученные данные о количественном выходе летучих веществ, вычисляется минимальное количество инертной пыли, обеспечивающее пылевзрывобезопасность горных выработок.

Первоначально производится отбор пробы инертной пыли в смеси с угольной пылью, для этого видимые наслоения пыли сметаются при помощи щетки и совка с боков, кровли и оборудования, размещенного в выработке. Далее проба просеивается через сита № 06, и с помощью специального дозатора, входящего в комплект оборудования для проведения анализа, отбирается проба весом 2–5 граммов. Далее отобранную пробу помещают в заранее подготовленную емкость, содержащую водный раствор ZnCl₂ с концентраций 60 %, что соответствует плотности 1,75 г/см³. После закрытия емкости пробкой производят кратковременное промешивание раствора ZnCl₂ совместно с отобранной пробой. Далее после визуального определения прекращения разделения пробы на легкие и тяжелые частицы, производят

замер объема тяжелых частиц, осевших на дно, и легких частиц, всплывших на поверхность. Данные замеры можно проводить, например, с помощью оптических средств или другими методами. К измеренным объемам частиц применяют поправочные коэффициенты для вычисления массовой доли угольной и инертной пыли в пробе.

Далее полученные массовые значения горючих и негорючих веществ сравниваются с минимально допустимыми значениями для выработки и делается вывод об уровне пылевзрывобезопасности выработки, а также о необходимости применения дополнительных мер для приведения выработки в безопасное состояние.

В ВостНИИ был разработан способ оценки отложений угольной пыли на основе вышеописанной методики [174].

Несмотря на простоту принципа, положенного в основу методики, сложность выполнения данной методики, большая длительность времени для проведения эксперимента, большой набор оборудования, используемого при применении данной методики, создали низкий потенциал для дальнейшей доработки методики с возможностью изготовления портативного прибора, реализующего ее.

Другим приборным методом контроля пылевзрывобезопасности является гравитационный метод, в котором для измерения общей осевшей пыли на протяжении выработки используются различные видов весов. Весы измеряют разницу веса между чистой подложкой и весом подложки с пылью, осевшей на неё за известный отрезок времени.

Гравитационный метод измерения пылеотложения в горных выработках реализован в виде автоматических электронных микровесов. Главное достоинство данного метода – это прямое измерение веса осевшей пыли на единицу поверхности за точно измеренный промежуток времени. Все операции, кроме отчистки подложки, в данном приборе автоматизированы [175]. Изображение датчика интенсивности пылеотложения ДИП-1 приведено на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Датчик интенсивности пылеотложения ДИП-1

Из-за сложности конструкции, наличия проблем, связанных с человеческим фактором, а также методологических проблем данный способ не нашел применения в шахтах. Хотя имеет определённый потенциал развития на основе современных технических достижений в электронике и физике.

Рассмотрим оптически метод измерения осевшей пыли – метод изменения оптической плотности фильтра с нанесённой на него пробой собранной отложившейся пыли. В данном методе предварительно производится сбор пыли на подложки, подложки осматриваются и с них удаляются крупные включения. Подложки должны располагаться таким образом, чтобы избежать попадания на них капельной влаги, либо «вторичной» пыли, поднятой в выработке вовремя перемещения людей, оборудования, работы локальных механизмов. После предварительной подготовки пробы пыль с подложки с помощью аспиратора наносится на специальный фильтрующий материал с известной, либо предварительно замеренной, светопропускаемостью. После нанесения пыли производится сравнение оптических плотностей фильтров до и после нанесения пробы пыли. Разность оптических плотностей с помощью предварительно известных коэффициентов пересчитывается в массу пыли, находящейся на ложке, а далее по известным данным в количество отложившейся пыли в выработке, за известный промежуток времени. На данный момент неизвестно о приборах,

реализующих данный метод контроля пылеотложения, а также о публикациях, рассматривающих метод в качестве перспективного.

В связи с высокой трудоемкостью, высоким количеством операций, влияющих на точность измерения, считаем данный метод не перспективным для улучшения.

В [176] предложена схема и конструкция прибора, основанного на радиоизотопном датчике (рисунок 3.4). Конструкция прибора содержит герметичный корпус, защищающий внутренности прибора от нежелательного попадания пыли. В корпусе прибора размещена подвижная лавсановая лента, обладающая достаточно малой толщиной, хорошей упругостью и стойкостью к температурным воздействиям, позволяющая многократно циклически проходить стадии отчистки и стадии набора пыли в пробоотборном устройстве. Данная система, в отличие от других радиоизотопных приборов, позволяет отказаться от использования расходного материала – фильтрующей ленты. Пыль в процессе естественного осаждения из окружающей среды под действием гравитационной силы формирует пробу на лавсановой пленке. Через определённые промежутки времени лента с отобранной пробой пыли перемещается в радиометрический блок, где происходит измерение средней поверхностной плотности. В случае недостаточного количества пыли в пробе происходит возврат, методом перемотки ленты, пробы в место, где продолжается естественное пылеосаждение. В случае если измерение признано успешным, лента продвигается в часть прибора, в которой происходит отчистка измеренной пробы, далее лента проматывается снова в место пробоотбора.

Следует отметить что данный прибор на время публикации находился в стадии проработки, основные параметры радиоизотопного источника (начальная интенсивность бета-излучения – 3 кГц, период измерения – 100 с) предполагалось установить по аналогии с прибором ИКАР.

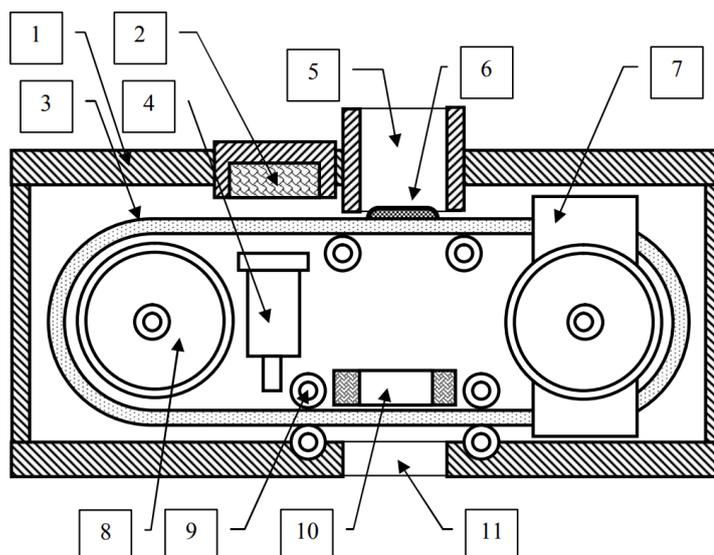


Рисунок 3.4 – Схема радиометрического датчика пылеотложения [308]: 1 – корпус датчика; 2 – источник бета-излучения; 3 – лавсановая лента, 4 – детектор бета-частиц; 5 – пробоотборный канал; 6 – формирующееся пятно пыли; 7 – лентопротяжное устройство; 8 – натяжной барабан; 9 – направляющие прижимные ролики; 10 – устройство очистки ленты; 11 – канал сброса пыли

Недостатки, отмеченные в радиоизотопных приборах с использованием фильтров для осаждения пыли: заполнение фильтра полностью происходит в течение 1 минуты при концентрации пыли 500 мг/м^3 . Однако показано, что время измерения для контроля пылеотложения может быть достаточно большим – порядка 12 часов при пылеотложении 600 мг/м^3 , для увеличения чувствительности до получения времени измерения концентрация в зоне ПДК следует увеличивать интенсивность источника бета-излучения в десятки и сотни раз [176].

Общий анализ публикаций по методам с использованием радиоизотопных источников показал, что измерение поглощения излучения непосредственно в запыленном воздухе не позволяет его использовать для прямого контроля пылеотложения, а также концентрации пыли в воздухе. Это связано со статистическим характером измерения, что создает проблемы с точностью измерения при низких концентрациях пыли – слишком долгое

время измерения, при высокой концентрации пыли – быстрый набор пыли на фильтрующий элемент. В общем, потенциально высокая техническая сложность прибора, разрабатываемого на основе радиоизотопных методов, а также потенциальное отношение персонала к «радиоактивным» приборам не позволили занять достойное место данным разработкам на угольных шахтах России.

Все вышеперечисленные методики, а также приборы, реализующие эти методики, обладающие рядом как преимуществ, так и недостатков, не позволили к 2004 году создать методику и техническое устройство, свободное от перечисленных недостатков.

На основе анализа различных методов измерения качества пылевзрывозащиты наиболее перспективным к дальнейшей модификации с целью упрощения, а также возможностью преобразования в техническое устройство следует выделить химический метод определения карбонатов кальция.

Назовем преимущества данного метода: возможность определения массовой концентрации основного компонента инертной пыли вне зависимости от влажности, гранулометрического состава, цвета, а также сопутствующих компонентов в пробе.

Важный недостаток метода – громоздкое оборудование и сложные методы регистрации результатов.

Основываясь на общем анализе существующих методик определения пылевзрывобезопасности горных выработок, сформулируем общие требования к разрабатываемой методике с учетом человеческого фактора:

1. Разрабатываемая методика должна обеспечивать приемлемую точность для проведения оперативных измерений.
2. Разрабатываемая методика должна быть применима в горных выработках, использующих пылевзрывозащиту, основанную на использовании инертной пыли.

3. Разрабатываемая методика должна быть безопасна для персонала, использующего её. В общем случае желательно применение методики без использования специализированных СИЗ либо специфических инструкций об обращении с опасными веществами.
4. Разрабатываемая методика должна иметь оперативной – время от контроля пылевзрывобезопасности горной выработки должно быть как можно более коротким.
5. Разрабатываемая методика должна обеспечивать возможность создания портативного технического устройства для оценки состояния пылевзрывобезопасности непосредственно в шахте.
6. Результаты, получаемые при выполнении методики, должны быть легко воспринимаемы персоналом шахт, без проведения дополнительных расчетов.

Так как основным компонентом инертной пыли является тонкоизмельченный известняк (доломит) [177], рассмотрим более подробно этот минерал.

Доломит является минералом, относящимся к классу природных карбонатов, и представляет собой карбонат кальция и магния. Формула доломита $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, реальный состав практически полностью соответствует теоретическому. При химическом анализе установлено, что в доломите примерно 45 % углекислого газа, 20 % оксида магния и до 30 % оксида кальция. Свое название он получил по фамилии первооткрывателя – Д. Доломье.

Одним из важных химических свойств данного минерала является, то что доломит растворяется в соляной кислоте с выделением углекислого газа.

За основу для разработки новой методики следует взять «химический» метод определения количества карбонатов, описанный в ГОСТ 13455-91 [310].

Идея данного метода состоит в измерения выхода количества газообразных продуктов реакции между кислотой и компонентами, входящими в состав инертной пыли.

Испытательная установка [178] для определения количества выделившегося диоксида углерода приведена на рисунке 3.5.

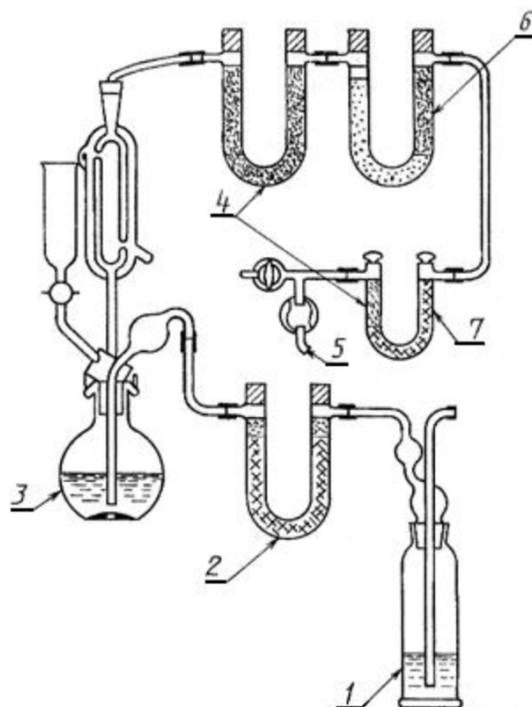


Рисунок 3.5 – Испытательная установка для определения количества выделившегося диоксида углерода:

1 – барботер с серной кислотой; 2 – поглотительная трубка с аскаритом (позиции 2 и 7); 3 – колба с капельной воронкой и двухповерхностным холодильником; 4 – поглотительная трубка с перхлоратом магния; 5 – патрубок, ведущий к насосу; 6 – поглотительная трубка с поглотителем сульфида водорода и слоем перхлората магния; 7 – поглотительная трубка с натронным асбестом и перхлоратом магния

Приведем описание проведения испытания [178] с использованием данной установки в соответствии с разделом 1.6 [178].

Тщательно взвешивают с точностью до 0,01 г около 5 г пробы и помещают в реакционную колбу, добавляют 5 капель смачивающего вещества и 100 см³ воды.

Закрывают колбу резиновой пробкой и интенсивно встряхивают для смачивания пробы.

Удаляют пробку и смывают попавшие на нее частицы пробы в колбу. Собирают установку, как показано на рисунке 3.5, держа кран на выходе воздуха из установки закрытым, и с помощью насоса пропускают через нее воздух со скоростью 50 см³/мин в течение 10 мин.

Прекращают продувку воздухом, закрывают кран между трубками 6 и 7, а также краны на обоих концах поглотительной трубки 7 и отсоединяют поглотительную трубку 7. Если в качестве поглотительной используют U-образную трубку без кранов, то на концы соединительных отростков трубки 7 надевают отрезки резиновых шлангов, закрытых с одной стороны оплавленными стеклянными палочками; перед взвешиванием отрезки шлангов снимают. Вытирают поглотительную трубку чистой сухой тканью, охлаждают до комнатной температуры и взвешивают. Вновь присоединяют поглотительную трубку к прибору, открывают краны на обоих концах поглотительной трубки и пропускают воздух, как прежде. Наливают в воронку 25 см³ соляной кислоты, соединяют систему с атмосферой, открывая кран на выходе воздуха из установки, дают стечь кислоте в реакционную колбу, снова закрывают кран на выходе воздуха из установки и продолжают продувать ее со скоростью около 50 см³/мин. Поднимают температуру жидкости в реакционной колбе с такой скоростью, чтобы она закипела через 15 мин. Продолжают кипячение в течение 30 мин; интенсивность кипения регулируют таким образом, чтобы пары полностью конденсировались в холодильнике. Прекращают продувку воздухом, отсоединяют поглотительную трубку, охлаждают и взвешивают.

Как видно из описания, в данной методике не только используются высокоопасные вещества, но и сама методика достаточно трудоемка.

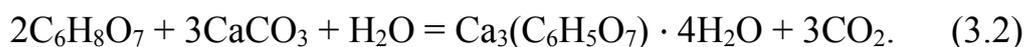
Следует модифицировать данную методику с целью упрощения проведения исследования, сокращения времени проведения исследования, возможности проведения исследования непосредственно в месте отбора

пробы, а также исключить использование опасных веществ соляной и серной кислот. В соответствии с разделом 4 «Требования безопасности» ГОСТ 857-95 «Кислота соляная техническая синтетическая» [179] вещество относится к классу 2 – «вещества высокоопасные». При попадании на кожу вызывает ожоги, способно раздражать верхние дыхательные пути и слизистые оболочки глаз. При работе с ними требуется специальная защита глаз и кожи. В соответствии с документом пунктом 4.2 ГОСТ 2184-2013 «Кислота серная техническая. Технические условия» [180] «техническая серная кислота токсична. По степени воздействия на организм относится к веществам 2-го класса опасности – вещества высокоопасные по ГОСТ 12,1,007» [181].

Приведем реакцию, происходящую между карбонатом кальция и соляной кислотой:



Заменим в данной формуле вещество с высокой степенью опасности – соляную кислоту, на вещество с умеренной опасностью – лимонную кислоту, ГОСТ 908-2004 «Кислота лимонная моногидрат пищевая. Технические условия» [313].



Добавка этилового спирта в исходный реактив позволяет разрушить пленку гидрофобизирующей добавки на поверхности частиц инертной пыли.

Также изменим методику в разделе определения количества выхода диоксида углерода.

Для отработки всех компонентов и методов разрабатываемой методики была создана экспериментальная установка.

Экспериментальная установка состоит из следующих элементов. Корпуса (шасси), в который установлены все электронные компоненты и элементы питания, а также разъемы для подключения внешних интерфейсов

сбора и передачи данных. Внешнего газопровода, соединявшего емкость с реактивом для проведения химической реакции с датчиком расхода газа, установленным в корпусе экспериментальной установки.

Также в корпусе установлена электронная плата с микроконтроллером, осуществляющим сбор информации с датчика, необходимые предварительные расчеты, индикацию промежуточных и конечных значений, хранение необходимых настроечных коэффициентов.

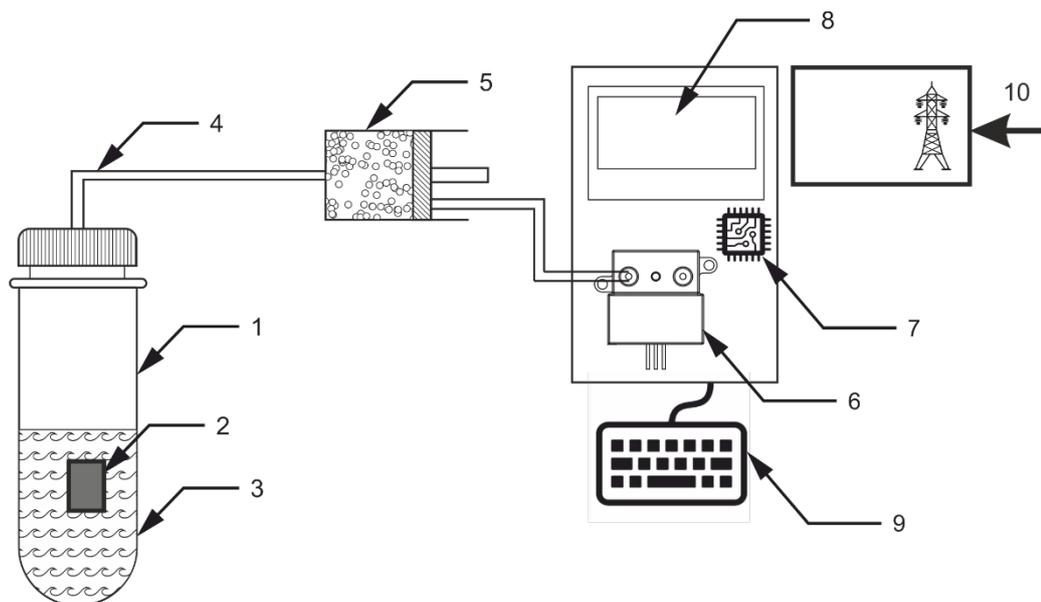


Рисунок 3.6 – Экспериментальная установка

Разработанная экспериментальная установка, изображенная на рисунке 3.6, состоит из корпуса, в котором размещены: дисплей отображения информации (8), электронная плата со встроенным программным обеспечением (7), датчик расхода газа (6), разъемы для подключения электрического питания (10) и клавиатуры (9). На внешней стороне корпуса экспериментальной установки располагается колбодержатель с колбой (1) и реактивом (3), а также помещённым в колбу пробоотборником (2). Колба соединена с датчиком расхода газа через газопровод (4), проходящий через патрон влагопоглотителя (5).

Датчик расхода газа, используемый в экспериментальной установке, имеет термоанемометрический принцип измерения скорости газового потока,

основанный на зависимости между скоростью потока и теплоотдачей горячей проволоки, помещенной в поток и нагретой электрическим током. Основная часть датчика расхода газа – измерительный мост, в одно плечо которого установлен чувствительный элемент в виде проволоки, изготовленной из платины, и укрепленный на керамической подложке. Количество теплоты, передаваемой нагретой проволокой потоку газа, зависит от физических характеристик движущейся среды, геометрии нагревательного элемента, а также ориентации нагревательного элемента в движущейся среде. С увеличением разницы температур между средой и чувствительным элементом чувствительность термоанемометра увеличивается. Сенсоры потока газа, построенные на данном принципе, отличаются малой инерциальностью, высокой чувствительностью, точностью и компактностью. Данные свойства термоанемометрических сенсоров позволяют их использовать при изучении потоков газа с низкой скоростью; неустановившихся течений; течений, проходящих в тонких каналах; в пограничном слое вблизи стенок.

В экспериментальной установке используется термоанемометрический сенсор массового расхода газа производства компании Honeywell (USA) Microbridge Mass Airflow Sensor, AWM43300V. Отличие данного сенсора состоит в установке в одном корпусе всех необходимых элементов для контроля скорости газового потока. Внешний вид сенсора приведен на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Внешний вид сенсора расхода газа AWM43300V,
Honeywell (USA)

Производитель заявляет следующие параметры данного сенсора.

Таблица 3.2 – Основные параметры датчика расхода газа

Наименование параметра	Значение параметра	Единицы измерения
Максимальная скорость потока газа через датчик	1000	см ³ /мин
Максимальное выходное напряжение	5	В, при скорости потока 1000 см ³ /мин
Значение напряжения при отсутствии потока газа	1	В
Время отклика	3	мсек, при изменении потока от 10 % до 90 % максимального значения
Диапазон температуры эксплуатации	От -25 до 85	С

На рисунке 3.8 приведена дополнительная схема контроля выходного сигнала и управления нагревателем в термоанемометрическом сенсоре, которая должна быть расположена на основной плате экспериментальной установки.

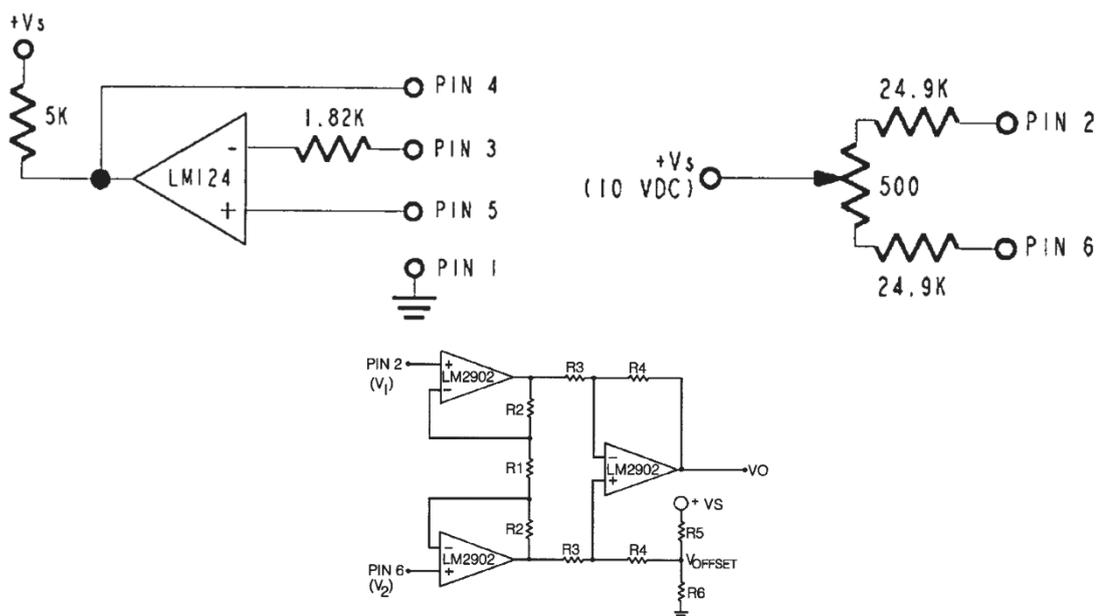


Рисунок 3.8 – Рекомендуемая производителем дополнительная схема контроля датчика

Приведем табличные данные соответствия скорости потока газа через датчик (а также перепада давления) с выходными значениями напряжения на датчике, а также значения, полученные аналого-цифровым преобразователем экспериментальной установки (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Выходные данные датчика экспериментальной установки

Напряжение на выходе датчика U, В	Значение аналого-цифрового преобразователя	Перепад давления, соответствующий данному потоку, мБар	Скорость потока воздуха, см ³ /мин.	Скорость потока углекислого, см ³ /мин.
1,00	205	0,00	0	0
2,49	510	0,08	100	135
3,23	662	0,19	200	270
3,76	770	0,33	300	405
4,15	850	0,50	400	540
4,43	907	0,71	500	675
4,63	948	0,94	600	810
4,78	979	1,16	700	945

Напряжение на выходе датчика U, В	Значение аналого-цифрового преобразователя	Перепад давления, соответствующий данному потоку, мБар	Скорость потока воздуха, см ³ /мин.	Скорость потока углекислого, см ³ /мин.
4,89	1001	1,52	800	1080
4,97	1018	1,87	900	1215
5,00	1024	2,23	1000	1350

На рисунке 3.9 представлен график зависимости выходного сигнала от скорости протекания газа. Из графика видно, что выходной сигнал существенно нелинейный по отношению к скорости. Это свойство датчика следует учесть при разработке математического аппарата линеаризующего показания датчика. Данная нелинейность присуща всем термоанемометрическим датчикам, измеряющим скорость движения газовой среды.

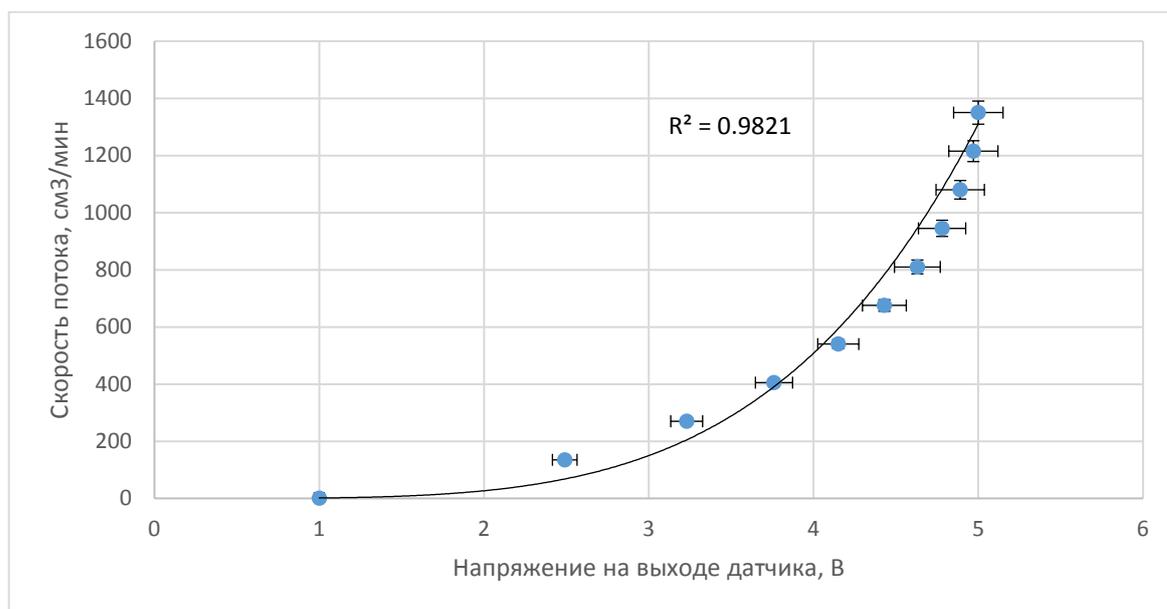


Рисунок 3.9 – Зависимость выходного сигнала датчика от скорости потока протекающего углекислого газа ($R^2=0,9821$)

В результате химической реакции, проходящей между инертной пылью и лимонной кислотой, выделяется углекислый газ. Далее газ поступает по газопроводу из емкости с реагентами к датчику расхода газа. Термоанемометрический датчик, измеряющий скорость прохождения газа,

чувствителен к целому набору физических факторов измеряемой среды: температуре газового потока, скорости газового потока, влажности газового потока, плотности и теплофизическим свойствам газового потока, температуре окружающей среды датчика, а в некоторых случаях и направлению движения газа. Часть этих факторов, такие как температура окружающей среды, температура газового потока и направление движения газа, учитываются компенсирующими элементами схемы. Другие факторы – теплофизические свойства газа и плотность принимаются неизменными в течение эксперимента и повторимыми от эксперимента к эксперименту – давление внутри ёмкости с реактивом минимально отличается от атмосферного давления, состав выделяющегося газа продиктован основными компонентами, вступающими в реакцию, и тоже неизменен. Единственным компонентом, параметры которого изменяются во время проведения эксперимента, что было установлено на экспериментальной установке, является – влажность. Вначале реакции, когда в ёмкости присутствует атмосферный воздух, результирующая смесь имеет пониженную влажность, но далее после вымывания сухого воздуха из ёмкости в датчик поступает углекислый газ повышенной влажности. Данное изменение влажности влияет на показания скорости газового потока, а также на интегральные показания объема вышедшего газа.

Для решения проблемы избыточной влаги при измерении выхода углекислого газа на газопроводе стоит влагопоглощающее устройство с изменяемым объемом камеры для засыпки влагопоглощающего реагента.

В качестве осушающего материала был выбран силикагель технический ГОСТ 3956-76 [182]. Данный материал обладает широкой доступностью, хорошими свойствами поглощения влаги, различными размерами зерен, что позволило подобрать наиболее удобный размер для помещения во влагопоглощающую камеру. Перед помещением во влагопоглощающую камеру силикагель прокаливался в сушильном шкафу при 150–180°C в течение 3–4 ч для удаления адсорбированной влаги.

На экспериментальной установке была проведена серия опытов для определения необходимого объема реагента для осушения поступающего газа в сенсор. Результаты данных экспериментов приведены в таблице. Установлено, что достаточно 5 см^3 влагопоглощающего материала для осушения поступающего газа.

Для применения в методике также следовало разработать и испытать пробоотборник для удобного и быстрого набора фиксированного объема пробы пыли перед помещением в испытательный раствор.

Предварительно рассматривались три варианта пробоотборников: пробоотборник в виде металлического цилиндра с дном, пробоотборник в виде прямоугольника с дном, а также в виде цилиндра с удлиненной ручкой. Для каждого вида пробоотборников, в рамках исследования методики, были проведены следующие испытания: измерение коэффициента уплотнения, измерения скорости реакции при помещении пробоотборника в испытательный раствор, измерения количества пробы, не вступившей в реакцию с раствором, время от помещения пробоотборника в испытательный раствор до снижения скорости выделения углекислого газа ниже предела обнаружения датчиком.

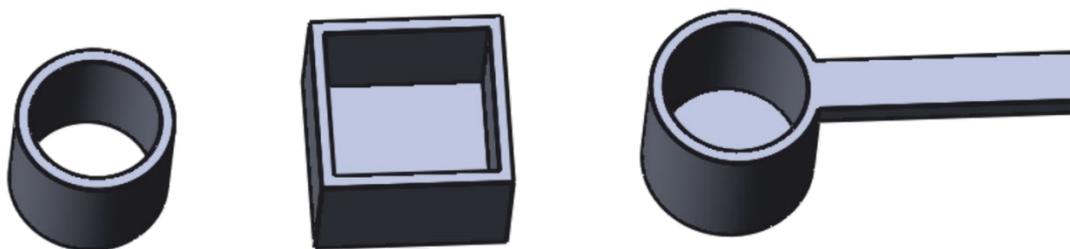


Рисунок 3.10 – Предварительные варианты пробоотборников для методики

Также был исследован коэффициент уплотнения для пробоотборника для определения достаточного объема пробы.

Таблица 3.4 – Коэффициент уплотнения пробы в проотборнике

Масса навески, $m_{\text{общ}}$	Масса инертной пыли, $m_{\text{ин}}$	Масса угольной пыли, $m_{\text{уг}}$	Коэффициент уплотнения, K
7,20	2,76	4,44	0,71
7,14	2,73	4,41	0,67
7,12	2,70	4,42	0,73
7,13	2,69	4,44	0,70
7,18	2,74	4,44	0,73
7,28	2,84	4,44	0,73
7,25	2,80	4,45	0,72
7,23	2,70	4,53	0,64
7,32	2,75	4,57	0,72
7,30	2,71	4,59	0,66
7,40	2,60	4,80	0,65
7,25	2,65	4,60	0,67
7,24	2,69	4,55	0,67
7,21	2,82	4,39	0,73
7,22	2,79	4,43	0,73
7,21	2,75	4,46	0,71
5,67	4,44	1,23	1,50
5,73	4,44	1,29	1,43
5,70	4,44	1,26	1,47
5,77	4,44	1,33	1,39
5,90	4,44	1,46	1,27
5,91	4,44	1,47	1,26
5,80	4,45	1,35	1,53
5,74	4,40	1,34	1,57
5,79	4,00	1,79	1,33
5,80	4,21	1,59	1,33
5,86	4,48	1,38	1,63
5,79	4,90	0,89	1,53
5,91	4,43	1,48	1,63
5,74	4,40	1,34	1,31
5,91	4,40	1,51	1,26
6,41	2,18	4,23	0,71

Масса навески, $m_{\text{общ}}$	Масса инертной пыли, $m_{\text{ин}}$	Масса угольной пыли, $m_{\text{уг}}$	Коэффициент уплотнения, K
6,33	2,10	4,23	0,74
6,34	2,11	4,23	0,74
6,32	2,09	4,23	0,74
6,36	2,13	4,23	0,73
5,23	4,23	1,00	1,55
5,26	4,23	1,03	1,51
5,25	4,23	1,02	1,52
5,30	4,23	1,07	1,45
5,37	4,23	1,14	1,36
5,38	4,23	1,15	1,35

Далее был проведен комплексный анализ системы «реактив-размер пробоотборника» на скорость и полноту реакции.

Для этого были подготовлены варианты реактива с различной концентрацией лимонной кислоты, а также были подготовлены пробоотборники, к группе испытуемых пробоотборников был добавлен дополнительный пробоотборник в виде закрытого с одной стороны цилиндра. Результаты проведенных исследований пробоотборников приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результат испытаний пробоотборников

Вид пробоотборника	Результат испытаний
Пробоотборник в виде цилиндра, открытого с одной стороны, и с удлиненной ручкой	Исключен из эксперимента из-за постоянных эргономических проблем, связанных с помещением пробы в пробоотборник в емкость для проведения реакции
Пробоотборник в виде цилиндра, открытого с одной стороны	Обнаружены остатки непрореагировавших компонентов пробы в месте соединения стенок и дна цилиндра
Пробоотборник в виде куба, открытого с одной стороны	Обнаружены остатки непрореагировавших компонентов пробы в месте соединения стенок и дна куба

Вид пробоотборника	Результат испытаний
Пробоотборник в виде цилиндра, открытого с двух сторон	Полное прохождения реакции компонентов пробы, самоочистка пробоотборника. Отмечено удобство набора пробы в пробоотборник

По результатам проведённых экспериментов установлено, что наиболее удобным с точки зрения эргономики является цилиндр с открытыми торцами. Также данная конфигурация пробоотборника способствует полному протеканию реакции компонентов пробы с лимонной кислотой, боковые сетки цилиндра не допускают к мгновенному вступлению в реакцию полный объем пробы, что снижает риск «вскипания» реактива при быстром выделении углекислого газа и попадании жидких и твердых продуктов, находящихся в емкости, в газопровод и в датчик расхода газа.

Зависимость от температуры

Для проверки параметров методики, касающихся скорости и полноты реакции в зависимости от температуры реактива, была поставлена серия экспериментов, при которой навеска инертной пыли помещалась в пробоотборник, помещающийся в емкость с реактивом различной температуры. Диапазон температур был выбран исходя из действующей на тот момент нормативной документации [183]. Диапазон температур для проведения эксперимента был расширен в сторону увеличения до 40°C для получения более полного представления о возможности использования данного реактива.

Эксперимент проводился на модифицированной экспериментальной установке, которая была доработана для возможности получения различных температур реактива. В состав экспериментальной установки был включен воздушный термостат, поддерживающий температуру раствора, расположенного внутри, с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$. Контроль температуры раствора осуществлялся с помощью термопары, температура раствора фиксировалась на момент начала эксперимента. В качестве навески для проведения эксперимента использовалась инертная пыль различной массы, без

добавления угольной пыли. В таблице приведены усредненные данные по серии экспериментов с различным весом навески.

Результаты данных экспериментов приведены в таблице 3.6. Анализируя таблицу, можно сделать вывод, что при всем диапазоне температур проведения эксперимента наблюдается примерно одинаковый выход объема углекислого газа. Также стоит отметить, что скорость прохождения реакции возрастает с ростом температуры, максимальное количество выхода газа соответствует первой минуте проведения реакции. Количество вышедшего газа в течение первой минуты эксперимента может изменяться более чем в 1,5, данное обстоятельство следует учесть при выборе датчика, определяющего расход газа. Также установлено, что общий объем диоксида углерода изменяется незначительно при изменении температуры реактива в течение времени эксперимента.

Зависимость от концентрации реактива

Для проверки параметров методики, касающихся скорости реакции в зависимости от концентрации лимонной кислоты в составе реактива, была проведена серия экспериментов. Результаты данных экспериментов приведены в таблице 3.7. Во время эксперимента контролировался выход углекислого газа как индикатора прохождения реакции, контролировалась полнота прохождения химической реакции в емкости с реактивом по измерению количества не прореагировавшего вещества.

При проведении эксперимента предварительно рассчитывалось необходимое количество лимонной кислоты для проведения полной реакции между реактивом и инертной пылью, помещаемой в емкость. Задача данного эксперимента – установить количество выходящего газа в единицу времени во время погружения проотборника в сосуд с реактивом. Данный натуральный эксперимент требуется для определения степени влияния формы проотборника на скорость прохождения реакции, а также на пиковые значения скорости выделения углекислого газа.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что концентрация раствора должна находиться в диапазоне 30-60 %. Именно при нахождении в данном диапазоне концентрация лимонной кислоты в реактиве оптимальна.

При концентрации в растворе лимонной кислоты ниже оптимального порога скорость реакции замедляется, и хотя в конечном итоге из-за избытка лимонной кислоты в первоначальном объеме реактива и постоянного выделения углекислого газа происходит нарушение баланса в реактиве, что способствует полному вступлению реагентов в соединение, длительность реакции при низкой концентрации кислоты неприемлемо продолжительная. Так как одной из особенностей разрабатываемой методики является ее оперативность, следует ограничить продолжительность реакции и, соответственно, использовать раствор с концентрацией кислоты не менее 30 %.

С другой стороны, использование раствора с высокой концентрацией лимонной кислоты резко снижает время проведения исследования пробы. К сожалению, при высоких концентрациях кислоты в реактиве, 60 % и более, начинают наблюдаться негативные факторы, которые могут привести к нарушению в работе технических устройств, использующих данную методику. Отмеченные негативные эффекты связаны с резким началом и протеканием реакции в начальной стадии, сразу после помещения проотборника в емкость с реактивом. Быстрое начало реакции между лимонной кислотой и инертной пылью приводит к резкому выделению большого объема газа, что вызывает следующие негативные последствия: вспенивание раствора лимонной кислоты, сопровождающееся в том числе и уносом реагирующих веществ в тракт датчика расхода газа; резкий скачок газовыделения, приводящий к перегрузке датчика расхода газа; унос частиц угольной пыли в приемное отверстие датчика расхода газа.

В дальнейшем при развитии методики для снижения пенообразования возможно применение различных добавок, снижающих образование пены.

Одной из возможных добавок может являться кремнеорганический пеногаситель, так как они обладают всем набором свойств, позволяющих их применять как компонент реактива. Силиконовые пеногасители эффективны при малых концентрациях, химически инертны, не токсичны, обладают продолжительным пеногасящим действием в широком диапазоне температур. Использование добавки в виде силиконового пеногасителя требует дальнейшей проработки. В таблице видно, что объем диоксида углерода, образующийся в результате реакции, после 420 секунды практически не зависит от температуры реактива.

Зависимость от дисперсного состава пыли

В связи с тем, что угольная пыль, которая образуется во время работы машин и механизмов, является полидисперсной с преобладанием различных фракций в зависимости от места выпадения, были разработаны эксперименты по определению влияния дисперсного состава угольной пыли.

Для проверки влияния дисперсного состава угольной пыли, являющимся в данной реакции, веществом, не вступающим в реакцию с основными компонентами реактива, на скорость протекания реакции между инертной пылью и реактивом, были проведены эксперименты для получения результатов о выделении диоксида углекислого газа в пробах с различной навеской как инертной пыли, так и дисперсным составом угольной пыли, входящей в пробу.

Предварительно были подготовлены пробы угольной пыли с различным дисперсным составом. Далее были приготовлены пробы из смеси инертной пыли и угольной пыли различного гранулометрического состава.

Нахождение зависимости было бы выполнено на экспериментальной установке без дополнительного оборудования. Данные о проведенных экспериментах приведены в таблице 3.8.

При анализе таблицы можно сделать вывод, что дисперсный состав пыли приборными методами не был определен. На основании данного эксперимента можно сделать заключение, что дисперсный состав пыли,

обычный для угольных шахт, не оказывает существенное влияние на скорость протекания реакции и выход углекислого газа во время проведения исследования по разрабатываемой методике.

Разработанная экспериментальная установка для проверки методики содержит в себе датчик расхода углекислого газа, основанный на термоанемометрическом принципе. Для датчиков такого вида существуют определенные ограничения, связанные с физическими основами построения сенсоров, с одной стороны, и технологическими ограничениями, связанными с производством сенсоров – с другой стороны.

Одним из серьезных ограничений эксплуатации сенсоров расхода газа является ограничение на влажность измеряемой среды. В документации обычно производитель указывает, что сенсор применяется только в среде сухого неагрессивного газа. Это связано с тем, что чувствительный элемент может деградировать при воздействии на него влаги, содержащейся в исследуемой среде. Для приведения углекислого газа к условиям, допустимым для датчика расхода газа, в экспериментальной установке был установлен влагопоглощающий элемент. Цель данного эксперимента в рамках разработки методики – выяснить объем вещества, адсорбирующего влагу.

Для проведения эксперимента была сделана различная навеска влагопоглощающего материала для засыпки во влагопоглощающий элемент (патрон).

Контроль работы влагопоглощающего элемента проводился с помощью датчика расхода газа. Для контроля влажности измеряемого газа использовался эффект, при котором влажный газ, воздействуя на чувствительный элемент сенсора, завышал показания скорости расхода газа. Пошагово изменяя объем влагопоглощающего материала, был определен необходимый и достаточный объем для осушения поступающего газа.

Данные эксперимента приведены в таблице 3.9. Следует отметить, что при использовании методики при реализации технического устройства необходимо использовать навеску влагопоглощающего вещества с учетом

эргономики технического устройства – пользователь не должен проводить замену влагопоглотителя после каждого экспресс-анализа.

Приведем краткое описание разработанной методики, использующейся для определения количественной добавки инертной пыли, соответствующей ГОСТ Р 51569-2000 [177].

Первоначально подготавливается представительный объем вещества для исследования по методике. Данный объем получают сметанием с бортов или почвы достаточного количества смеси угольной и инертной пыли, после чего 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, состоящим из кислоты и вспомогательных веществ.

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

Одновременно с закрытием крышки колбы включают счетчик газа (датчик расхода газа).

В течение времени прохождения реакции объем выделившегося углекислого газа регистрируется подключённым счетчиком газа.

После окончания реакции в колбе, определяемой по счетчику газа либо по истечению 600 секунд, регистрируется 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 по заранее заданным калибровочным коэффициентам.

После проведения измерения использованный реактив утилизируют.

Для реализации методики в виде экспериментального электронного устройства было подготовлено техническое задание с основными требованиями к конструкции устройства.

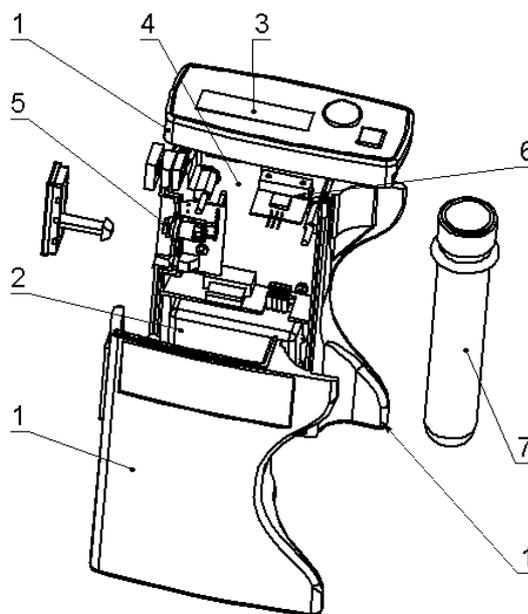


Рисунок 3.11 – Техническое устройство для определения количества инертной пыли в пробе

Разработанное устройство, изображенное на рисунке 3.10, состоит из корпуса (1), в котором размещены: элементы питания электронной схемы (2), дисплей отображения информации (3), электронная плата со встроенным программным обеспечением (4), электрические разъемы для зарядки батарей и обмена данными (5), датчик расхода газа (6), снаружи прибора к нему крепится колба с реактивом (7), в которую помещается пробоотборник.

Выполнение измерения на устройстве выполняется на основании разработанной методики, упомянутой выше, при этом все операции, кроме отбора пробы и помещения пробоотборника в колбу, автоматизированы.

Конструкция технического устройства, а также метод измерения запатентованы следующими патентами: RU138693U1, RU2249816C1, RU37384U1.

Результат измерения выдается в цифровом виде на электронном дисплее прибора в виде надписи «Содержание сланцевой пыли XX %», где XX является процентным содержанием инертной пыли в отобранной пробе.

Параллельно с разработкой методики, прибора шли подготовительные работы для внесения данного прибора в реестр средств измерений.

На момент создания прибора, в 2004 году, в государственном реестре эталонов отсутствовали средства для поверки измерительных систем для контроля пылевзрывобезопасности в горных выработках угольных шахт. Данный факт не позволял провести испытания с целью утверждения типа разработанного технического средства. Утверждение типа средства измерения осуществляется в целях обеспечения единства измерений, являющегося необходимым условием получения метрологи-чески сопоставимых и совместимых результатов измерений. Более того, в соответствии с «Правилами применения технических устройств на опасных производственных объектах» средства измерений должны иметь сертификат об утверждении типа средства измерения.

Для проведения испытаний с целью утверждения типа прибора 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 и ему присвоен номер 04.06.001 (ГСО 8868-2007).

Перед началом серийного производства была проведена сертификация прибора с целью получения разрешения на эксплуатацию прибора в шахтах, опасных по взрывам угольной пыли и рудничного газа (метана), также в Росстандарте был получен сертификат на тип средства измерения, подтверждающие метрологические свойства разработанного прибора. На созданном производстве была организована сервисная и метрологическая

службы сопровождения приборов во время и после гарантийного срока эксплуатации.

Серийный выпуск прибора начат 04.06.2004 г. После начала выпуска приборов были собраны и проанализированы отзывы от эксплуатантов прибора, после чего была составлена программа улучшения эргономических характеристик прибора.

За прошедшее время было выпущено свыше 1000 приборов различных модификаций, в том числе: первой модификации – 20 шт.; второй модификации – 400 шт.; третьей модификации – 900 шт.

Это позволило оснастить приборами контроля пылевзрывобезопасности все угольные шахты России.

Для оценки количества произведенных измерений можно использовать объем поставленного реактива на шахты, эксплуатирующие прибор. Количество измерений в рамках контроля пылевзрывобезопасности, в год, проведенных приборами ПКП на угольных шахтах России, оценивается в пределах 150–300 тысяч измерений.

Таблица 3.6 – Количество диоксида углерода, выделившегося из инертной пыли при взаимодействии с лимонной кислотой в зависимости от температуры

Температура, С	Время эксперимента, с										Суммарный выход
	0–60	61–120	121– 180	181– 240	241– 300	301– 360	361– 420	421– 480	481– 540	541– 600	
2	260,00	82,50	67,50	37,50	12,50	40,00	15,00	10,00	5,00	10,00	447,50
8	268,07	70,40	49,96	28,18	11,07	23,60	15,59	8,63	5,55	5,55	416,60
10	297,00	63,18	46,53	22,78	13,79	21,85	16,31	9,13	5,37	5,37	429,49
15	338,60	50,81	40,06	20,70	11,14	14,74	11,65	8,00	4,96	4,96	450,17
18	382,00	57,50	32,50	12,50	10,00	12,50	12,50	7,50	7,50	10,00	484,50
20	374,19	40,51	30,49	14,68	8,52	8,00	14,03	6,03	4,59	4,59	459,87
22	395,87	37,28	27,50	17,50	10,00	7,50	12,50	5,00	2,50	7,50	478,16
27	418,71	27,23	18,35	8,48	9,64	4,40	10,08	4,40	3,71	3,71	472,76
33	437,04	19,58	14,57	8,59	6,46	3,85	10,83	3,27	3,01	3,01	479,78
35	423,21	17,19	11,04	7,00	5,51	1,62	6,52	3,39	2,55	2,55	458,44
40	412,49	12,83	7,02	3,26	3,83	0,83	5,88	1,99	2,03	2,03	435,59

Таблица 3.7 – Количество диоксида углерода, выделившегося из инертной при взаимодействии с лимонной кислотой в зависимости от концентрации раствора

Концентрация лимонной кислоты в растворе, %	Время эксперимента, с									
	0–60	61–120	121– 180	181– 240	241– 300	301– 360	361– 420	421– 480	481– 540	541– 600
10	316,58	96,26	78,09	38,80	9,20	43,87	11,72	5,98	2,01	6,18
15	319,78	76,74	63,17	25,81	3,55	24,74	0,29	0,60	3,53	3,07
20	336,08	76,41	58,35	28,21	10,81	21,11	7,75	5,62	1,83	0,57
30	352,62	73,49	54,42	24,53	6,67	18,22	10,91	5,04	1,50	1,90
35	364,79	58,68	38,13	13,18	0,71	5,21	6,37	1,66	7,17	6,40
40	396,66	56,86	38,65	17,04	9,25	6,60	12,24	2,23	1,66	0,59
45	426,70	55,26	30,38	4,14	0,51	2,82	1,74	4,90	6,29	4,84
50	469,34	64,86	32,81	8,65	4,98	9,55	9,75	1,76	2,46	3,63
70	474,21	44,71	29,10	8,17	4,03	9,47	6,11	2,02	4,12	1,82
80	498,83	39,77	26,42	15,34	3,18	2,71	6,60	0,64	5,83	0,54
85	495,56	25,49	12,67	6,03	3,90	7,41	0,05	7,51	2,07	5,12
90	510,28	28,00	18,12	6,73	1,91	1,26	8,50	2,73	1,02	0,82
95	510,23	15,19	6,22	4,37	7,49	6,92	1,36	3,65	6,39	5,39
100	527,39	15,69	10,93	0,43	2,31	1,39	4,51	3,07	2,20	3,80

Таблица 3.8 – Исследование дисперсного состава компонентов пробы на выделение углекислого газа

Масса инертной пыли в пробе, г	Масса угольной пыли в пробе, г	Дисперсный состав угольной пыли (колонки таблицы) и соответствующий ему выделившийся объем углекислого газа, см ³					
		R ₁₀₀₀	Φ _{500/1000}	Φ _{200/500}	Φ _{90/200}	Φ _{50/90}	D ₅₀
1	9	202,63	185,63	170,63	189,63	208,63	194,63
2	8	345,24	332,24	362,24	350,24	330,24	342,24
3	7	532,38	525,38	516,38	527,38	528,38	548,38
4	6	718,05	728,05	739,05	730,05	739,05	718,05
5	5	927,23	973,23	942,23	956,23	970,23	937,23
6	4	1171,94	1204,94	1214,94	1198,94	1191,94	1210,94
7	3	1446,18	1459,18	1456,18	1460,18	1452,18	1448,18
8	2	1745,94	1734,94	1739,94	1710,94	1710,94	1724,94
9	1	2019,22	2016,22	2031,22	2045,22	2053,22	2012,22

Таблица 3.9 – Влияние на показания термоанеметрического датчика скорости газового потока наличия влагопоглощающего устройства в линии подачи газа

Объем влагопоглощающего материала, см ³	Номер эксперимента / выделившийся объем CO ₂ , см ³					
	1	2	3	4	5	6
1	735,05	824,05	641,05	785,05	829,05	792,05
2	590,77	593,77	673,77	603,77	628,77	748,77
3	625,38	533,38	652,38	487,38	540,38	510,38
4	555,15	569,15	578,15	583,15	543,15	585,15
5	442,87	431,87	453,87	412,87	437,87	425,87
10	428,52	461,52	449,52	461,52	430,52	426,52
15	456,05	448,05	417,05	429,05	423,05	445,05
25	425,70	451,70	459,70	427,70	460,70	419,70
35	425,23	424,23	447,23	432,23	408,23	418,23

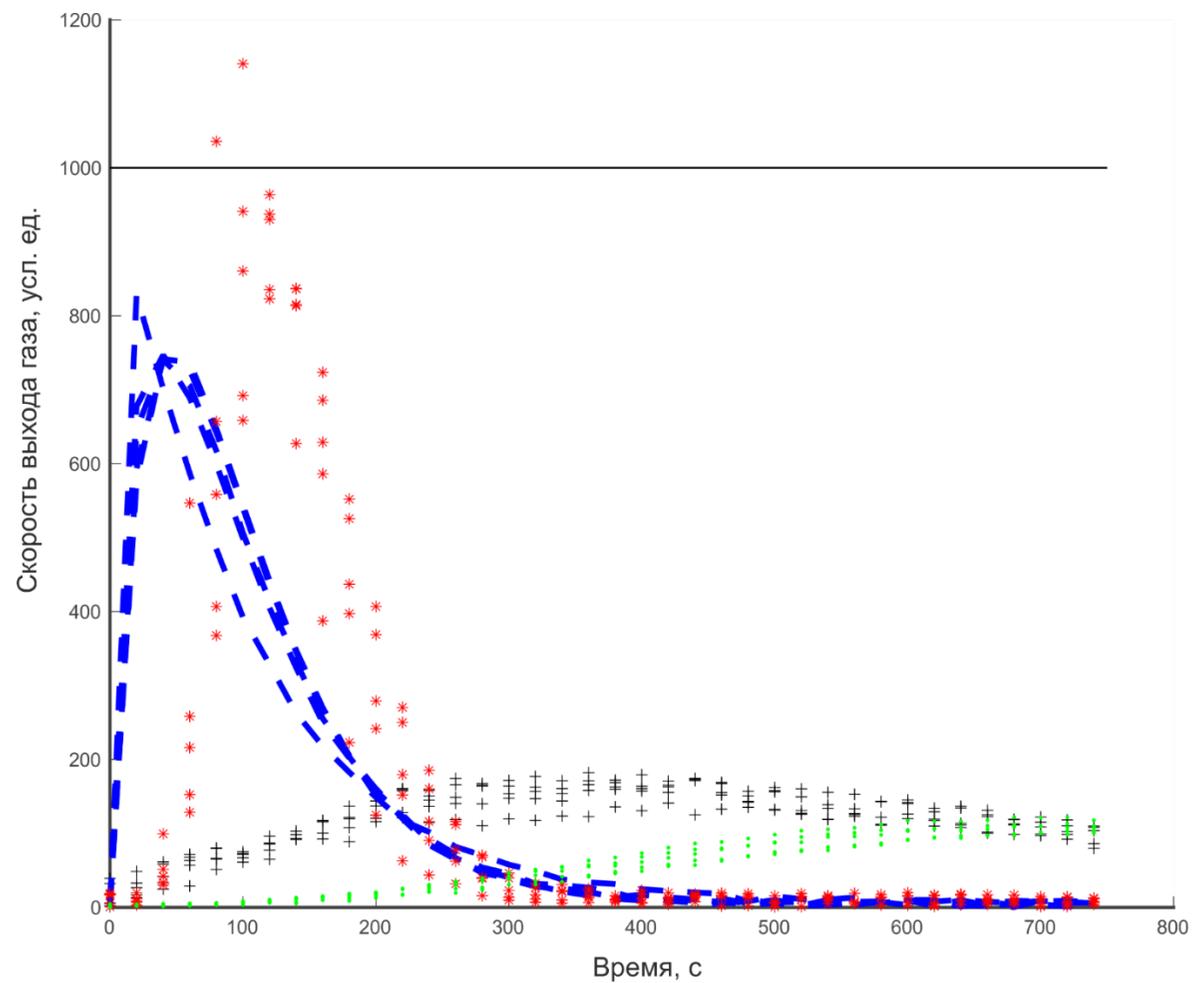


Рисунок 3.12 – Скорость выхода газа при помещении пробоотборников различного вида в реактив («+» - закрытый цилиндр, «.» - закрытый цилиндр 2, «*» - кубический пробоотборник, «-» - открытый цилиндр).

Выводы по главе

1. 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 мин.

2. Создан государственный стандартный образец (ГСО), обеспечивающий единство измерений содержания доли инертной пыли в смеси инертной и угольной пыли для проведения действий по поверке и настройке оборудования, обеспечивающего контроль пылевзрывобезопасности.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВИТАЮЩЕЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ВОЗДУХЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НЕПОСРЕДСТВЕННО В ТОЧКЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Как уже было описано в главе 1, в настоящее время зарегистрировано в виде патентов на полезную модель или в виде патентов на способы измерения достаточно большое количество приборов для проведения оперативного контроля пылевой обстановки. Предварительно данное многообразие приборов можно разбить на две основные подгруппы: приборы и методы с предварительным осаждением пыли на промежуточный носитель, а также способы и приборы, непосредственно измеряющие концентрацию пыли в воздухе.

Проведем анализ данных способов и методов (методик) измерения для оценки возможности их совершенствования с целью разработки современной методики оперативной оценки концентрации пыли в воздухе рабочей зоны.

Группа методов с предварительным осаждением пыли на промежуточный носитель

Весовой метод [184, 185].

Идея метода заключается в предварительном осаждении пылевых частиц, находящихся в измеряемой пылегазовой среде на промежуточный носитель. Обычно таким носителем являются различные фильтровальные материалы: бумага или ткань. После дополнительной обработки, связанной с контролем влажности фильтра, проводится взвешивание осажденной пыли совместно с фильтром, по разнице веса фильтра до начала осаждения пыли и после вычисляется количество осевшей пыли. Далее, используя известные данные об объеме прошедшей через фильтр пылегазовой среды и плотности материала частиц, производится вычисление массовой концентрации пыли в исследуемом объеме.

Преимуществами данного метода являются: прямое измерение массы пыли, отсутствие влияния дисперсного состава измеряемой пыли, а также отсутствие влияния химического состава пыли на результаты измерений. Серьезными недостатками данного метода являются: высокая трудоемкость проведения измерений, влияние человеческого фактора на проведение измерений, а также существенная погрешность. Техническое устройство, реализующее данную методику в условиях высокой запыленности в угольных шахтах, взрывоопасности атмосферы, может получиться излишне требовательным к режимам эксплуатации, обслуживания, контроля. На данный момент считаем улучшение данной методики с возможностью доведения ее до реализации в виде технического устройства нецелесообразным.

Радиоизотопный метод с промежуточным осаждением [186–188]

Метод, использующий свойство радиоактивного излучения поглощаться в отобранном слое пыли. Предварительно в течение некоторого времени происходит накопление пыли на фильтровальном материале, данное накопление может происходить как естественным способом – осаждение пыли посредством гравитационных сил, так и с использованием механических побудителей, например, насоса, прокачивающего пылегазовую среду через фильтровальный материал. В случае использования побудителя расхода фиксируется объем прокаченной пылегазовой среды, в случае использования гравитационного осаждения измеряется время длительности осаждения пыли.

При измерении массы осевшей пыли используется β -излучение, так как оно обладает свойствами достаточно хорошо проникать в исследуемый материал, хорошо изучено с точки зрения закономерностей проникновения в толщу исследуемых веществ. При всех достоинствах метода выделим несколько особенностей, на которые стоит обратить внимание при разработке новой методики. Методы, основанные на измерении поглощения радиоактивного излучения, имеют чувствительность к влажности исследуемой пробы, что в пылевоздушном потоке шахты, влажность которого

может иметь сезонные изменения, имеет вероятность негативно сказаться на точности измерения. Также существует определённая насторожённость со стороны обслуживающего персонала, эксплуатирующего оборудование, с которым нужно соблюдать дополнительные меры предосторожности. А также после различных аварий, связанных с радиацией, у персонала развивается радиотревожность – такое состояние человека, при котором он субъективно завышает уровень возможных последствий при работе с предметами, имеющими маркировку, связанную с радиацией.

Данный метод, как и другие способы и методы, использующие различные виды радиоактивного излучения, может найти применение, но в связи с отсутствием необходимого оборудования в лаборатории развитие данного метода не является приоритетным для разработки новой методики измерения.

Оптический метод с промежуточным осаждением [189–192]

При использовании данного метода измеряется ослабление оптического излучения, проходящего через предварительно осажденную из воздуха пробу пылевого аэрозоля. Так же как в весовом методе, описанном ранее, производятся операции по подготовке и отбору пробы, но вместо взвешивания используется источник и фотоприемник излучения для измерения степени поглощения пылевым осадком оптического излучения, также существует разновидность метода, где измеряется отражательная способность пылевого осадка.

Следует отметить, что на результаты измерения сильное влияние оказывает цвет и отражательная способность частиц, составляющих пылевой аэрозоль.

Другая разновидность оптического метода с предварительным осаждением – люминесцентный метод, в котором обработанный раствором люминесцирующего препарата фильтр собирает пылевой осадок из пылегазовой смеси, при этом фильтр освещается источником излучения, возбуждающим фотолюминесценцию. Приемные фотоэлементы, настроенные

на длину волны излучения фотолюминесценции, регистрируют изменения интенсивности излучения при нарастании пылевого осадка на фильтре.

Достоинство данного метода – широкие диапазоны чувствительности, сравнительно простое оборудование реализующее данный метод. Из недостатков следует отметить возможное влияние химического состава частиц на фотолюминесцирующий препарат, а также влияние влаги на интенсивность излучения.

Пьезоэлектрический метод [193–196]

Одним из производных весового метода может являться метод, основанный на использовании в качестве элемента, измеряющего вес пылевых частиц, пьезокристалл. Пьезоэлемент включается в электронную цепь, генерирующую колебания определённой частоты, при возникновении на поверхности кварцевого элемента слоя частичек пыли возникает изменение резонансной частоты колебаний, что указывает на изменение веса чувствительного элемента. Считается, что изменение частоты колебаний линейно зависит от изменения веса сенсора с измеряемыми частицами пыли. Часто для ускорения набора массы частиц на измерительном элементе используются дополнительные средства, такие как: липкие составы, прокачка воздуха, коронирующий разряд.

Краткое описание прибора, реализующего пьезоэлектрический метод измерения, представлено ниже.

«В корпусе блока управления расположена воздуходувка. Блок регистрации установлен на верхнем торце корпуса устройства и расположен в отдельном кожухе. Пылемер имеет автономное и сетевое питание. Вместе с принадлежностями размещается в специальной носимой сумке.

Принцип действия блока регистрации основан на заряде частиц пыли в поле коронного разряда, создаваемого высоковольтным электродом, и последующим их осаждением на поверхности датчика пыли, в качестве которого используется кварцевый пьезоэлемент. При осаждении частиц пыли

на поверхность датчика происходит изменение частоты его колебаний, которое пропорционально массе осевшей пыли» [197].

Основные недостатки данной методики связаны с влиянием влажности измеряемой пыли, а также электрических свойств пылевого осадка. Практически во всех реализациях данной методики для ускорения сбора пыли на чувствительный элемент применяются методы, которые в дальнейшем будет невозможно использовать во взрывоопасной обстановке, например, шахтах.

Считаем улучшение данного метода нецелесообразным.

Использование воды как среды для улавливания пыли

В данном методе промежуточной средой для улавливания пыли является вода, которая улавливает частички пыли из пылевоздушной среды, при этом вода либо распыляется в измеряемой среде, либо воздух с пылевым аэрозолем пропускается через объем воды. После прокачивания известного объема воздуха через систему пылеулавливания с помощью оптического метода измеряют степень ослабления излучения при его прохождении через воду с пробой пыли.

К недостаткам следует отнести сложность выполнения данного метода в виде экспериментальной установки, а также невозможность измерения концентрации частиц водорастворимых веществ.

Далее рассмотрим методы измерения концентрации пылевого аэрозоля без использования различного рода предварительных осадений.

Оптические методы [198–200]

В общем случае все оптические методы можно разделить на: голографический метод, абсорбционный, метод интегрального светорассеяния и метод лазерного зондирования. Основными в данной классификации являются методы, измеряющие снижения интенсивности оптического излучения, проходящего через измеряемую среду, и методы, измеряющие интенсивность отражённого света от исследуемой среды.

Абсорбционный метод [201–203] использует свойство пылегазовой среды поглощать проходящее через него излучение частичками пылевого аэрозоля.

Важными преимуществами данного метода являются высокая скорость измерения, сравнительная простота реализации, хорошая возможность автоматизации процессов измерения. К недостаткам следует отнести сложность калибровки данных систем, а также узкий диапазон измеряемых концентраций пыли.

Другая разновидность оптического метода – метод интегрального светорассеяния [204–206] – использует свойство пылегазовой среды рассеивать проходящее через неё излучение, рассеянное излучение собирается фотоприёмниками, расположенными в измерительной камере, и анализируется. По интенсивности рассеянного излучения в различных направлениях можно судить о дисперсном составе пылевого аэрозоля, а также о концентрации частиц в воздухе.

На данном методе могут быть построены измерительные приборы высокой чувствительности, недостаток данного метода – сложная оптическая система.

Оптический голографический метод [207] использует построение голограммы, являющейся наложением проекции пылевых частиц, находящихся в воздухе на поле источника освещения. Важной особенностью метода является получение информации о каждой частице в измеряемом объеме, включая ее геометрические размеры и положение в пространстве. После получения голографического изображения и увеличения его в несколько раз количество частиц подсчитывается либо с использованием оптико-электронных средств, либо вручную. С помощью данного метода можно производить измерение частиц от 0,1 до 1000 мкм. Разновидность данного метода с использованием осветителя со временем вспышки до 10 наносекунд позволяет измерять быстротекающие процессы в пылевых аэрозолях.

Высокая сложность реализации данного метода для проведения измерений в действующих шахтах делает его неперспективным для усовершенствования.

Системы, использующие лазерное зондирование [208–209], работают по принципу лидара, но со специальной фотоприёмной установкой, позволяющей анализировать поступающее фотоизображение. Для измерения размеров частиц аэрозоля используются импульсные лазеры повышенной мощности, импульс излучения «освещает» частицы аэрозоля, отраженный свет улавливается специальной оптической системой и фокусируется на приёмную матрицу либо фотоэлектронный умножитель. Ранее для регистрации изображения, получаемого таким способом, использовалась фотопленка, сейчас могут быть использованы современные фотоприёмные матрицы. Далее с использованием счётно-вычислительных устройств производится обработка принятого сигнала. К недостаткам данного метода следует отнести сложность установки, реализующей его, а также использование лазерного излучения высокой мощности.

К общим недостаткам оптических приборов можно отнести: техническая сложность создания прибора, работающего в постоянно запыленной атмосфере, сложности с юстировкой оптических частей прибора.

Рассмотрим различные методы измерения массовой концентрации пыли без предварительного осаждения с использованием эффектов переноса заряда или электрические методы. Среди данных методов выделим наиболее перспективные для анализа: контактно-электрический, емкостной, индукционный (трибоэлектрический) и пьезоэлектрический.

В основу трибоэлектрического метода положено то явление, что при вхождении в контакт частицы пылевого обмениваются электронами со специальным измерительным щупом. Так как частицы постоянно находятся в движении и соударяются с измерительным щупом, образуются поверхности с положительным и отрицательными зарядами. Специальный электрометрический усилитель, подключенный к измерительному устройству,

усиливает сигнал, полученный с измерительного щупа, и преобразует его в выходной сигнал, связанный с концентрацией пыли. Уровень выходного сигнала зависит от механических и электрически свойств пыли.

Достоинством данной методики является простота реализации, широкий диапазон измеряемой концентрации пыли. К недостаткам стоит отнести высокое влияние скорости движения частиц на выходной сигнал, а также работоспособность только в сухой атмосфере. Данная методика нашла применение для контроля концентрации пыли в дымоходах с целью мониторинга целостности противопылевых фильтров.

В контактно-электрическом [210, 211] методе заряд частиц происходит на специальном электроде или камере, через которую проходят частицы. Находясь в электризаторе, частица приобретает заряд, который переносит на другой измерительный электрод, специальная аппаратура регистрирует ток, возникающий в цепи электризатора и измерительного электрода, по величине тока можно судить о количестве частиц, перенёвших заряд между электродами. Так же как и в предыдущем методе, сильное влияние на измерения данным методом оказывает влажность пыли, среды и физико-химические свойства измеряемых частиц. Также существуют ограничения на максимальную концентрацию частиц, измеряемых таким методом.

Метод, в котором измеряют изменение емкости воздушного конденсатора при внесении между его обкладками частичек пыли, называется емкостным [212]. Данный измерительный конденсатор включается в цепь колебательного контура – генератора, при этом существует эталонный генератор, и, сравнивая частоты эталонного генератора и измерительного, по разности частот можно произвести измерение концентрации частиц пыли, находящихся между обкладками измерительного конденсатора. Так же как и все методы, использующие электрические взаимодействия, при измерении концентрации данный метод чувствителен к влажности и физическим свойствам пыли.

Развитие емкостного метода – метод счета частиц с использованием обкладок конденсатора, при этом с помощью специального устройства снижают количество частиц до количества, которое генерирует одиночные импульсы при пролете измерительного конденсатора. Данные одиночные импульсы регистрируют счетчиком импульсов и выдают на дисплей.

Модификация пьезоэлектрического метода для контроля счетного количества пролетающих пылевых частиц регистрирует каждое соударение частички с измерительным пьезокристаллом [213], которое подсчитывается и выдается на дисплей. Для наиболее эффективного соударения частиц и измерительного элемента создается специальная камера, в которой пылевой поток движется по заранее рассчитанной траектории для максимальной эффективности попадания частичек пыли на пьезоэлемент. Серьезные ограничения данного метода связаны с размерами частиц и скоростью движения пылегазовой среды. Для снижения данных неблагоприятных факторов используются специальные устройства, подающие пылегазовый поток с фиксированной скоростью.

Ультразвуковой или акустический метод [214-217]

Данный метод основан на поглощения частичками пыли энергии акустических колебаний, создаваемых в пылегазовой среде, обычно для этого в измерительной камере, через которую проходит измеряемая среда, устанавливают приемник и излучатель звуковых или ультразвуковых волн. Электронная схема может измерять либо степень затухания сигнала, либо время задержки распространения сигнала в измерительной камере. Данные методы имеют высокую погрешность измерений и низкую чувствительность – более 100 г/м³. Развитие данного метода считаем нецелесообразным.

По проведенному детальному анализу различных методик измерения массовой концентрации угольной пыли, а также приборов, реализующих данные методики, можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотренные методики имеют различные недостатки, создающие серьезные технические затруднения при создании как экспериментальных

установок для реализации методик, так и разработки технического устройства для решения проблемы пылевого контроля в угольных шахтах, что не позволяет в должной мере обеспечить требования охраны труда по контролю витающей пыли в воздухе.

2. Наиболее подходящие методики для экспресс-анализа: вариации оптического метода, а также методика, предложенная коллективом автором, включающим диссертанта, основанная на измерении изменения сопротивления фильтрующего элемента вследствие возникновения на нем пылевого осадка, которая позволит обеспечить оперативный контроль за состоянием условий труда по пылевому фактору.

Далее в этой главе рассмотрим создание экспериментальной установки для реализации методики измерения массовой концентрации угольной пыли через измерение аэродинамического сопротивления фильтра при прокачивании через него пылегазовой среды.

4.1. Разработка экспериментальной установки

Рассмотрим методику экспресс-анализа массовой концентрации угольной пыли, основанную на определении аэродинамического сопротивления фильтрующего элемента, расположенного в прокачиваемом пылевоздушном потоке.

Следует отметить, что, как показано ранее в главе 2, при разрушении угля основная доля выхода частиц угольной пыли находится в диапазоне 5–15 мкм.

Предварительно в качестве побудителя расхода пылевоздушной среды рассматривались следующие варианты: радиальный, диагональный и центробежный вентиляторы.

Для проверки работоспособности и оценки параметров разрабатываемой экспериментальной установки она помещалась в испытательный стенд.

Внешний вид установки показан на рисунке 4.1. Установка состоит из металлической аэродинамической трубы со средствами создания пылевого аэрозоля заданной концентрации, а также необходимой аппаратурой по контролю скорости воздушного потока, подачи вещества для создания пыли.

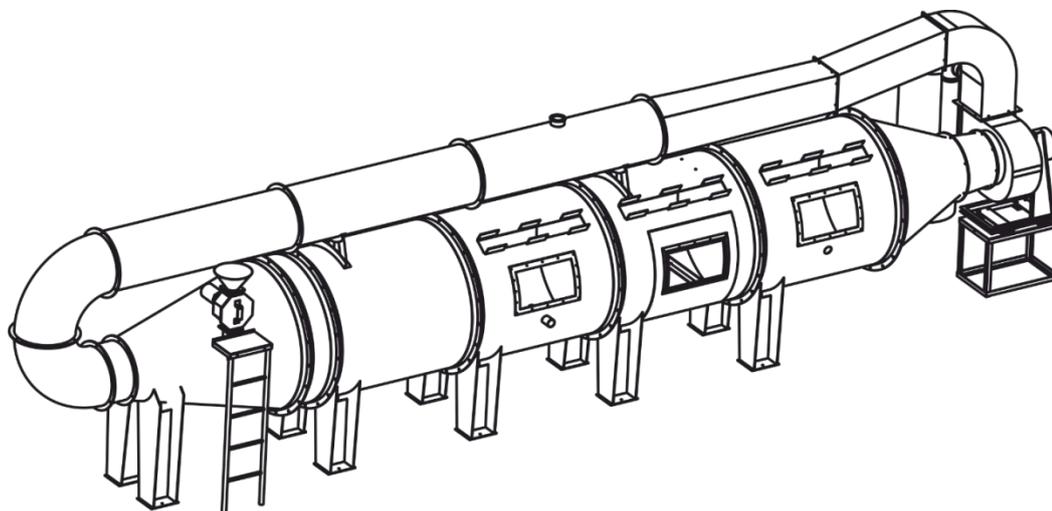


Рисунок 4.1 – Схема стенда УПП–1: 1 –система дозирования; 2 – прозрачные вставки; 3 – корпус; 4 – центробежный вентилятор

На данной установке предварительно были проведены эксперименты по проверки изменения аэродинамического сопротивления для фильтров АФА с целью оценки численных параметров данных изменений и уточнения параметров разрабатываемой экспериментальной установки.

В исследования принимала участие пыль различных фракций до 100 мкм, изготовленная из угля марок Д, Г, Ж.

Схема исследования была следующей: новый фильтр предварительно взвешивался на аналитический весах 1 класса точности и устанавливался в фильтродержатель, далее в установке УПП-1 создавался пылевой аэрозоль методом подачи необходимого количества предварительно приготовленной угольной пыли в воздушный поток, создаваемый вентилятором установки УПП-1. Далее в пылевой аэрозоль, созданный в установке УПП-1, вносился фильтродержатель с установленным фильтром и включался побудитель расхода. Во время исследования фиксировался перепад давлений на фильтре,

расход воздуха через фильтр. После окончания измерения фильтр извлекался из фильтродержателя и взвешивался. Контроль времени исследования происходил с помощью секундомера. На основании данных этого исследования были определены следующие предварительные характеристики разрабатываемой экспериментальной установки.

Таблица 4.1 – Параметры экспериментальной установки

Наименование параметра	Диапазон значений	Единицы измерения
Скорость расхода воздушной смеси	5–25	л/мин
Диапазон времени измерения	30–360	секунд

Далее после постановки значительного числа экспериментов с фильтрами АФА было установлено, что поверхность фильтра изготовлена таким образом, что при попадании на неё пылевых частиц исследуемых фракций угля снижение пропускной способности фильтра недостаточно для уверенной регистрации требуемых концентраций пыли. Исходя из поставленного эксперимента были выдвинуты следующие требования к фильтрующему элементу:

- достаточно высокая способность к задержанию пыли;
- однородность структуры фильтровального материала;
- аэродинамическое сопротивление фильтровального материала должно быть стабильным вне зависимости от влажности материала;
- падение пропускной способности при проведении экспериментальных исследований должно быть не менее 20 %;
- фильтровальный материал должен уверенно задерживать все частицы пыли размерами свыше 0,5 мкм.

Исходя из поставленных требований для экспериментальной установки, был проведен поиск различных образцов фильтровальных элементов. После получения необходимого количества образцов от производителей были

проведены эксперименты по соответствию данных материалов представленным требованиям.

Предварительно были проверены формальные технические параметры фильтровальных материалов в партиях: однородность структуры, внешний вид структуры фильтровальных элементов, отсутствие отверстий и порванных фрагментов. Далее фильтровальный материал был высушен для контроля веса изготавливаемых фильтровальных элементов.

Из фильтровального материала были изготовлены фильтры круглой формы, диаметром 48 мм. Далее фильтры были взвешены для контроля отклонения толщины фильтровального материала на весах 1-го класса точности и был определён средний вес для каждого фильтровального материала [218]. Весь фильтровальный материал предварительно был помещен в помещение, где проводились исследования на 24 часа для выравнивания характеристик между образцами [219].

Затем была получена характеристика пропускной способности фильтровальных элементов с использованием чистого воздуха и определён разброс показаний для каждого представленного образца.

Данные по экспериментам позволили выбрать фильтровальный элемент, который наиболее подходил для помещения в экспериментальную установку с целью проработки методики измерения.

Данные, полученные в результате исследования фильтровального материала, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики фильтров

Наименование показателя	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Размер задерживаемых частиц, не более	0,2	0,5	0,5	0,5
Измеренная поверхностная плотность, мг/см ²	110±3	120±5	90±5	220±7

Скорость воздушного потока, л/мин	11,5–16,5	4,0–16,0	11,0–23	4,1–7,1
---	-----------	----------	---------	---------

В результате проведенных исследований установлено, что наиболее подходящими под выставленные требования являются фильтровальные материалы под наименованиями «тип 1» и «тип 4».

Фильтры, изготавливаемые из материала «тип 4», являются более трудоёмкими при производстве, требовалась дополнительная обработка бумаги.

Исходя из вышеизложенного, был выбран «Тип 1» для фильтровальных элементов.

Далее были проведены исследования по изменению скорости фильтрации при запылении фильтрующего элемента.

Данное исследование проходило по аналогичной схеме, как и тестирование для фильтров АФА, и было проведено на стенде УПП-1. Были размолоты различные марки угля, а также породная пыль. Длительность исследований варьировалась от 3 до 10 минут, общее количество проведенных экспериментов составило свыше 1500. Данные исследования представлены в таблице 4.3 и на рисунке 4.2.

Таблица 4.3 – Определение зависимости скорости фильтрации фильтрующего элемента от величины навески

Изменение веса фильтра, мг	Стартовая скорость воздушного потока, л/мин	Конечная скорость воздушного потока, л/мин	Рост сопротивле- ния, %	Уменьшение расхода воздуха, л/мин
0,51	11,08	8,92	19 %	2,16
0,99	15,30	11,90	22 %	3,40
1,50	13,20	9,91	25 %	3,29

Изменение веса фильтра, мг	Стартовая скорость воздушного потока, л/мин	Конечная скорость воздушного потока, л/мин	Рост сопротивле- ния, %	Уменьшение расхода воздуха, л/мин
1,99	13,69	9,82	28 %	3,87
2,50	14,09	9,70	31 %	4,39
3,01	11,18	7,28	35 %	3,90
4,02	12,58	7,78	38 %	4,81
4,98	13,40	7,92	41 %	5,49
0,49	10,89	8,72	20 %	2,17
0,99	12,70	9,80	23 %	2,90
1,50	14,19	10,52	26 %	3,67
2,02	12,70	8,99	29 %	3,70
2,49	15,12	10,30	32 %	4,82
3,02	12,60	8,08	36 %	4,53
3,51	13,10	8,00	39 %	5,10
3,99	13,41	7,79	42 %	5,62
0,49	11,71	9,51	19 %	2,21
1,00	12,48	9,91	21 %	2,58
1,49	12,10	9,20	24 %	2,90
1,98	13,49	9,69	28 %	3,80
2,48	13,71	9,29	32 %	4,42
3,00	12,90	8,22	36 %	4,69
3,51	14,21	8,60	39 %	5,60
4,02	14,09	7,98	43 %	6,11

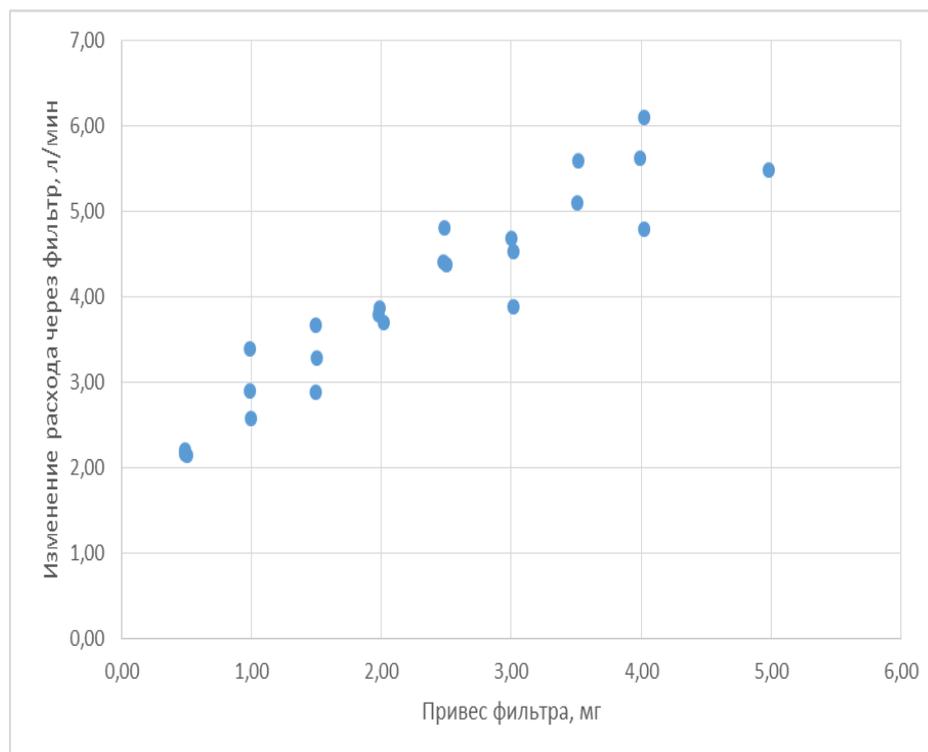


Рисунок 4.2 – Падение скорости фильтрации в зависимости от привеса фильтра (линейная интерполяция, $R^2=0,84$)

Эксперимент продемонстрировал линейную связь между скоростью фильтрации через фильтровальный элемент, изготовленный из материала «тип 1» с привесом пыли на фильтрующем элементе.

После проведенных исследований фильтрующих элементов было установлено, что для разрабатываемой методики, основанной на измерении изменения аэродинамического сопротивления фильтровального элемента с учетом ранее поставленных условий, фильтровальные элементы, изготовленные из материала «тип 1», удовлетворяют всем поставленным требованиям.

Предварительные исследования показали, что выбранная за основу идея работоспособная, а также были получены предварительные оценки физических параметров для создания экспериментальной установки.

Экспериментальная установка предназначена для моделирования всех параметров разрабатываемой методики проведения измерения и получения

численных значений исходных параметров для расчета массовой концентрации пылевого аэрозоля.

Экспериментальная установка реализует способ измерения массовой концентрации пылевого аэрозоля через фильтрующий элемент с образованием осадка, влияющего на аэродинамическое сопротивление фильтра и изменяющего разность давлений на внутренней и наружной поверхностях фильтрующего элемента.

Предварительные эксперименты показали, что существует четкая взаимосвязь между снижением скорости фильтрации через фильтр, изготовленный из материала «тип 1», и привесом угольной пыли на фильтре.

Далее коротко сформулируем теоретические предпосылки для создания математической модели фильтрации для разрабатываемой экспериментальной установки.

Известно [202], что при фильтровании происходят процессы, которые можно разделить на три группы в зависимости от параметров фильтрации и скорости изменения веса твердых частиц на фильтре П:

- 1) $P < 100$ – фильтрование с появлением осадка;
- 2) $100 < P < 1000$ – фильтрование промежуточного вида;
- 3) $P > 1000$ – наблюдается закупоривание пор при фильтровании.

В исследуемом случае мы рассматриваем частицы витающей пыли малого размера, как было показано ранее, с пиком выхода при разрушении около 10 мкм. При этом в общем случае скорость нарастания осадка будет одного порядка со скоростью фильтрации, т. е. разрабатываемая методика будет находиться в зоне параметра, при котором будет наблюдаться рост осадка.

Приведем общие законы, характеризующие фильтрацию [220–221]:

$$\frac{dV}{Sd\tau} = \frac{\Delta P}{\mu(R_{oc} + R_{\phi n})}, \quad (4.1)$$

где V – общий объем прошедшей пылегазовой смеси, м^3 ; S – размер фильтра, м^2 ; τ – время проведения эксперимента, с ; ΔP – возникающая дельта давлений, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$; μ – вязкость воздуха, $\text{кг} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$; R_{oc} – параметры слоя осадка, м^{-1} ; $R_{\phi n}$ – сопротивление фильтрующего элемента, м^{-1} .

Приведем представление параметра R_{oc} в следующем виде:

$$R_{oc} = r_0 x_0 \frac{V}{S}, \quad (4.2)$$

где r_0 – удельное объемное сопротивление осадка, м^{-2} ; x_0 – отношение объема осадка к объему запыленного воздуха.

Совместив выражение 4.2 и 4.1, получим уравнение, описывающее в дифференциальной форме фильтрацию с несжимаемым осадком и фильтровальным элементом.

$$\frac{dV}{S d\tau} = \frac{\Delta P}{\mu \left(r_0 x_0 \frac{V}{S} + R_{\phi n} \right)}, \quad (4.3)$$

где V/S – толщина слоя осадка на фильтрующем элементе.

Приведём на рисунке 4.3 схему экспериментальной установки для проведения дальнейших исследований по разработке методики.

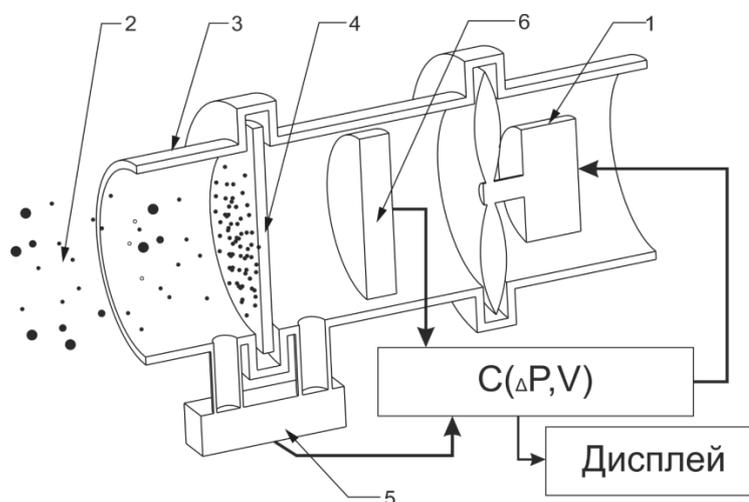


Рисунок 4.3 – Экспериментальная установка

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 воздуха через фильтрующий элемент (4) регистрируется датчиком расхода воздуха (6).

На экспериментальной установке были проведены исследования по определению метода измерения перепада давления, измерению количества прошедшего воздуха через фильтр, а также подбора оптимальной скорости прокачивания воздуха через фильтр.

Для проведения исследований были изготовлены фильтры диаметром 48 мм из ранее исследованного фильтровального материала «тип 1». Предварительно перед помещением в установку фильтры выдерживались в помещении, где происходило исследование, и взвешивались. В установке УПП-1 создавался пылевой аэрозоль, и экспериментальная установка помещалась для проведения исследования. Через промежутки времени, кратные 10 секундам, установка извлекалась из стенда УПП-1, и фильтры взвешивались, а также производился расчет толщины слоя пыли на фильтре и возникающий перепад давлений.

Таблица 4.4 – Результаты исследования параметров фильтрации

Время измерения, с	Привес фильтра, кг	Расчетная толщина слоя пыли q , м	τ/q , с/м
10	2,1245E-06	7,89E-07	13957138
20	2,7757E-06	1,03E-06	18224379
30	3,4698E-06	1,29E-06	2277210
40	4,0877E-06	1,52E-06	26821292

Время измерения, с	Привес фильтра, кг	Расчетная толщина слоя пыли q , м	τ/q , с/м
50	4,7512E-06	1,76E-06	31123229
60	4,7091E-06	1,75E-06	30878278
70	5,622E-06	2,08E-06	36873909
80	5,724E-06	2,12E-06	37534851
90	5,8284E-06	2,16E-06	38212168
100	6,2718E-06	2,32E-06	41113989
110	6,8465E-06	2,54E-06	44889328
120	6,7303E-06	2,49E-06	44134324
130	7,0052E-06	2,6E-06	45936361
140	7,724E-06	2,86E-06	50646567
150	7,8384E-06	2,9E-06	51395236
160	8,1765E-06	3,03E-06	53656997
170	8,1779E-06	3,03E-06	53678868
180	8,5009E-06	3,15E-06	55745251
190	8,7339E-06	3,24E-06	34262854
200	9,2323E-06	3,42E-06	60458959
210	9,7386E-06	3,61E-06	63856231
220	9,0185E-06	3,34E-06	59128679
230	9,3183E-06	3,45E-06	61092787
240	1,0213E-05	3,78E-06	66953909
250	1,0322E-05	3,82E-06	67670590

По результатам поставленных экспериментов, а также проведенных аналитических исследований была рассчитана начальная скорость фильтрации для выбранного фильтровального материала – скорость составила 13–14 л/мин.

Далее была определена минимальная скорость пылевоздушного потока для однозначного решения уравнений, описывающих поведение фильтра, – скорость составила не менее 5 л/мин.

Данные параметры были установлены для экспериментальной установки в качестве оптимальных для дальнейших исследований.

Далее на экспериментальной установке был разработан алгоритм контроля расхода воздуха через фильтр и алгоритм контроля аэродинамического сопротивления фильтра с использованием одного датчика.

В экспериментальной установке используется термоанемометрический сенсор массового расхода газа производства компании Honeywell (USA) Microbridge Mass Airflow Sensor, AWM43300V (рисунок 3.6), аналогичный используемому в методике, изложенной в главе 3.



Рисунок 4.4 – Внешний вид сенсора расхода газа AWM43300V, Honeywell (USA)

Производитель заявляет следующие параметры данного сенсора.

Таблица 4.5 – Основные параметры датчика расхода газа

Наименование параметра	Значение параметра	Единицы измерения
Максимальная скорость потока газа через датчик	1000	см ³ /мин
Максимальное выходное напряжение	5	В, при скорости потока 1000 см ³ /мин
Значение напряжения при отсутствии потока газа	1	В
Время отклика	3	мсек,

Наименование параметра	Значение параметра	Единицы измерения
		при изменении потока от 10 % до 90 % максимального значения
Диапазон температуры эксплуатации	От –25 до 85	С

Датчик установлен таким образом, что измеряет перепад давлений между пространством, в котором установлен побудитель расхода воздуха, и внешнем атмосферным давлением. Благодаря тому, что датчик имеет высокую чувствительность, использование данной схемы позволило измерять малейшие изменения в аэродинамическом сопротивлении фильтра.

Использование разработанного математического алгоритма позволило варьировать время измерения для более точного контроля низкой запыленности, а также сократить время измерения при высокой запыленности.

В таблице 4.6 приведены значение выходного сигнала для различных значений перепада давлений, возникающих на фильтрующем элементе.

Таблица 4.6 – Общие данные по контролю перепада давления с помощью датчика расхода газа

Напряжение на выходе датчика	Значение АЦП, отсчеты	Перепад давлений, мБар	Расход воздуха через датчик, л/мин (справочно)
5	1023	2,23	1000
4,97	1017	1,87	900
4,89	1001	1,52	800
4,78	978	1,16	700
4,63	948	0,94	600
4,43	907	0,71	500
4,15	849	0,5	400
3,76	770	0,33	300
3,23	661	0,19	200
2,49	509	0,08	100
1	204	0	0

Для контроля расхода воздуха в экспериментальной установке использовались два счетчика газа ГСБ-400 и РГС-2.



Рисунок 4.5 – Расходомер-счетчик газа РГС-2



Рисунок 4.6 – Счетчик газа барабанного типа ГСБ-400

На основе проведенных экспериментов была установлена эмпирическая зависимость для экспериментальной установки, связывающая изменение выходного сигнала датчика перепада давления на линейном участке работы датчика с объемом прокаченного воздуха и изменением аэродинамического сопротивления фильтра.

Данная зависимость была выражена в виде следующей формулы:

$$C = \frac{a \cdot m^b \cdot \Delta P(U)}{V(U)}, \quad (4.4)$$

где C – массовая запыленность воздуха, мг/м³; $\Delta P(U)$ – перепад давления на фильтрующем элементе, Па; $V(U)$ – объем прокаченного воздуха через фильтрующий элемент, м³; a , b – коэффициенты, зависящие от экспериментальной установки.

Здесь функции $\Delta P(U)$, $V(U)$ зависят от выходного напряжения датчика расхода газа.

В процессе дальнейших стендовых испытаний было установлено, что скорость прокачки воздуха через влияет на погрешность измерений, особенно при первоначальном наборе навески на фильтр. Данные экспериментальных исследований приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты исследования погрешности методики при измерении запылённости на экспериментальной установке

№	Массовая концентрация пыли, мг/м ³	Стартовая скорость пылегазового потока, л/мин	Изменение веса фильтра, мг	Рассчитанная ошибка измерения, %
1	50±5	11,025	0,5202	42,42
2		10,695	0,6592	29,29
3		11,875	0,8051	7,84
4		14,445	0,9408	9,09
5		15,95	1,078	21,78
6		14,26	1,2019	33,28
7	100±10	11,025	1,302	27
8		11,5	1,421	11,76
9		11,75	1,6224	4,85
10		12,42	1,7444	8,24
11		15,805	2,0678	26,19
12		13,795	2,3766	40,17
13	300±30	9,135	3,5017	27,84

№	Массовая концентрация пыли, мг/м ³	Стартовая скорость пылегазового потока, л/мин	Изменение веса фильтра, мг	Рассчитанная ошибка измерения, %
14		11,615	4,0964	18,81
15		13,75	4,6926	6,65
16		14,715	5,0825	6,3
17		12,76	6,192	27,54
18		14,26	6,6528	37,37
19		600±50	9,765	7,2696
20	10,465		7,1136	22,8
21	12,875		8,588	8,24
22	12,42		9,8895	5,88
23	14,5		12,2261	22,05
24	13,485		13,734	33,33

В экспериментальном исследовании использовался уголь марки Г, размолотый до фракции с крупностью частиц до 100 мкм.

Время измерения варьировалось от 30 до 300 секунд. Общее количество измерений превысило 2000 замеров. В том числе была проверена методика с управляемым расходом воздуха через фильтрующий элемент, заключающаяся в том, что в зависимости от изменения расхода воздуха через фильтрующий элемент изменялась скорость работы вентилятора таким образом, чтобы расход всегда оставался фиксированным.

Из таблицы видно, что погрешность измерения, выявленная на экспериментальной установке, достигает значения 40 %, что неприемлемо при проведении измерений.

На основании данных исследований в формулу была внесена следующая корректировка:

$$C = \frac{a \cdot m^{b(\theta)} \cdot \Delta P(U)}{V(U)} \quad (4.5)$$

Коэффициент $b(\theta)$ – стал зависим от начальной скорости фильтрации θ .

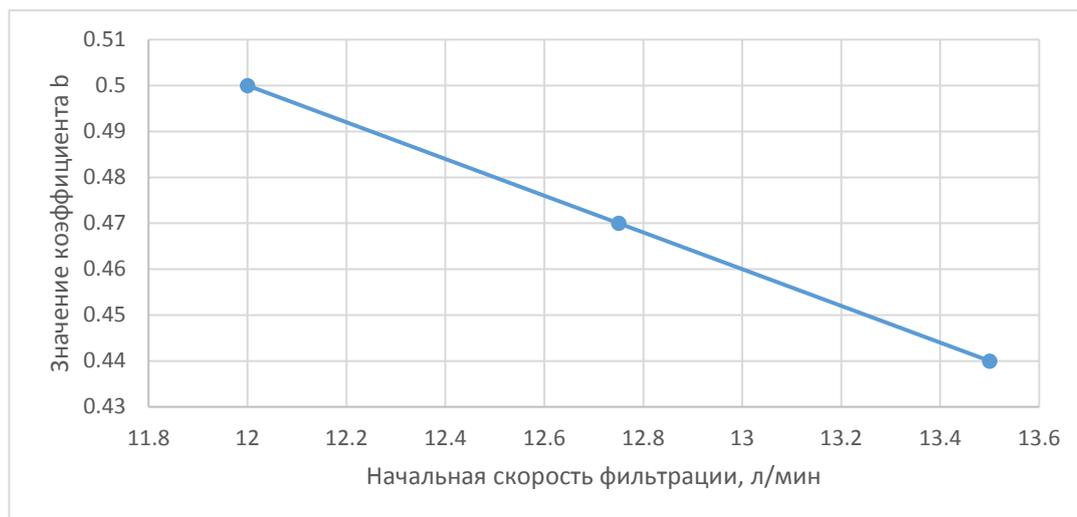


Рисунок 4.7 – Зависимость коэффициента b от начальной скорости фильтрации (линейная интерполяция, $R^2=0,95$)

Далее было определено необходимое и достаточное значение перепада давления, создаваемого на фильтре. Для этого была проведено свыше 1000 экспериментальных замеров.

Чистый фильтр взвешивался на аналитических весах 1 класса точности и помещался в экспериментальную установку, программное обеспечение отслеживало нарастающее аэродинамическое сопротивление фильтра, установленного в пылевой камере установки УПП-1, после заранее установленного порога побудитель экспериментальной установки отключался и фильтр извлекался из экспериментальной установки. Далее определялась навеска пыли, собранная на фильтре. Также фиксировалось количество пройденного воздуха через фильтровальный материал. В пылевой камере создавался пылевой аэрозоль с размерами частиц до 100 мкм из углей марок К, Ж, Д, ДГ и породной пыли. В программу для расчета поступали следующие данные: вес фильтра до начала измерений (m_1 , мг), привес, появившийся на фильтре (Δm , мг), общий вес запыленного фильтра (m_2 , мг), стартовая скорость прохождения воздуха, значение запыленности воздуха по

независимым от экспериментальной установки данным ($\text{мг}/\text{м}^3$), время измерения, общий расход через фильтр.

Концентрация пыли в установке УПП-1 определялась по формуле

$$C = \frac{1000 \cdot \Delta m}{V}, \quad (4.6)$$

где Δm – привес пыли на фильтре, мг; V – объем прошедшего воздуха, м^3 .

Далее рассчитывалась погрешность для проведенных экспериментов:

$$\delta_n = \frac{C_{\text{ЭКС}} - C_{\text{ЭТ}}}{100} \cdot 100, \quad (4.7)$$

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{C_{\text{ЭКС}} - C_{\text{ЭТ}}}{C_{\text{ЭТ}}} \cdot 100, \quad (4.8)$$

где $C_{\text{ЭКС}}$ – значение, полученное на экспериментальной установке; $C_{\text{ЭТ}}$ – значение контрольного прибора.

Для расчета погрешности диапазон измерений был разбит на два поддиапазона: 0–100 $\text{мг}/\text{м}^3$ и свыше 100 $\text{мг}/\text{м}^3$.

В таблице 4.8 приведены результаты, полученные на экспериментальной установке, с расчетом погрешности измерения при различных пороговых значениях изменения аэродинамического сопротивления фильтра в экспериментальной установке.

Таблица 4.8 – Результаты определения оптимального значения возрастания аэродинамического сопротивления фильтра

Δm , мг	$V_{\text{в.п}}$, л	Продолжительность измерения, с	Относительное изменение аэродинамического сопротивления фильтра	$C_{\text{ЭТ}}$, $\text{мг}/\text{м}^3$	$C_{\text{ЭКС}}$, $\text{мг}/\text{м}^3$	δ , %
5,30	3,0	19	1,00	1782,26	1058,76	68 %

Δm , мг	$V_{в,п}$, л	Продолжительность измерения, с	Относительное изменение аэродинамического сопротивления фильтра	$C_{ЭГ}$, мг/м ³	$C_{ЭК}$, мг/м ³	δ , %
4,65	11,8	65	1,00	395,07	636,79	38 %
3,10	21,1	118	1,00	147,05	205,51	28 %
2,91	27,6	168	1,00	105,69	72,30	33 %
1,73	38,4	215	1,00	45,16	85,55	40 %
3,98	2,9	21	0,75	1371,72	1613,96	15 %
3,10	8,7	50	0,75	356,32	267,60	33 %
2,27	17,8	90	0,75	127,17	148,58	14 %
1,63	24,4	154	0,75	67,01	86,63	20 %
1,06	37,3	213	0,75	28,28	11,27	17 %
3,17	2,3	15	0,50	1375,00	1112,80	24 %
2,75	4,7	25	0,50	588,46	660,84	11 %
1,94	9,2	45	0,50	210,71	203,74	3 %
1,46	12,5	68	0,50	116,72	106,31	10 %
0,91	21,1	169	0,50	43,11	44,95	2 %
2,78	2,2	12	0,35	1262,59	1343,09	6 %
2,14	4,0	20	0,35	536,84	531,69	1 %
1,75	5,2	17	0,35	333,71	359,21	7 %
1,06	8,2	44	0,35	128,28	118,63	8 %
0,38	18,2	119	0,35	20,85	28,70	8 %
1,96	1,2	10	0,25	1701,39	2027,88	16 %
1,68	3,5	16	0,25	475,96	605,98	21 %
1,33	5,0	24	0,25	262,63	203,25	29 %
0,67	10,2	48	0,25	65,90	100,19	34 %
0,38	18,9	96	0,25	20,29	47,57	27 %
5,90	3,3	19	1,00	1807,60	1194,80	51 %
5,15	10,5	65	1,00	492,26	749,52	34 %
3,84	21,2	122	1,00	181,31	244,90	26 %
3,13	29,6	167	1,00	105,78	799,28	87 %
2,24	41,7	247	1,00	53,79	78,50	25 %
3,94	3,9	21	0,75	999,24	811,72	23 %
3,66	9,0	58	0,75	408,77	510,72	20 %
2,38	16,0	82	0,75	148,74	182,57	19 %
1,78	26,1	158	0,75	68,18	93,66	25 %
1,44	37,7	207	0,75	38,18	55,24	17 %
3,33	2,5	14	0,50	1332,80	1179,12	13 %
2,70	4,2	26	0,50	645,93	651,65	1 %
2,10	9,3	44	0,50	226,24	210,99	7 %
1,53	11,7	71	0,50	130,36	116,16	12 %

Δm , мг	$V_{в,п}$, л	Продолжительность измерения, с	Относительное изменение аэродинамического сопротивления фильтра	$C_{ЭГ}$, мг/м ³	$C_{ЭК}$, мг/м ³	δ , %
1,12	23,7	156	0,50	47,31	48,74	1 %
2,78	2,0	9	0,35	1408,91	1512,24	7 %
2,58	3,2	18	0,35	804,69	849,81	5 %
1,98	5,4	21	0,35	365,93	332,90	10 %
1,41	9,8	43	0,35	144,40	165,84	13 %
0,88	19,5	108	0,35	45,31	41,72	4 %
2,16	1,5	10	0,25	1442,00	1607,97	10 %
1,65	3,0	19	0,25	554,10	638,84	13 %
1,14	5,4	29	0,25	211,27	149,59	41 %
0,67	11,5	40	0,25	58,21	27,78	30 %

При значениях прироста аэродинамического сопротивления (ПАС) выше 75 % возникает рост погрешности измерения на концентрациях свыше 450 мг/м³, связанный со слишком быстрым набором предельной навески пылевого аэрозоля на фильтре. При значениях ПАС менее 35 % снижается точность измерений на концентрациях ниже 150 мг/м³, связанных с недостаточным набором привеса на фильтре.

Было установлено, что наиболее оптимальным изменением аэродинамического сопротивления фильтра является прирост сопротивления на 35 %. Данный прирост позволит снизить погрешность до приемлемого уровня в 20 % и сократить время измерения до 180 секунд при низкой запыленности.

Данные формулы были введены в счётно-решающее устройство экспериментальной установки, а также был введён следующий алгоритм работы установки.

После включения установки фиксируется начальная скорость фильтрации и сопротивления фильтрующего элемента, далее при фиксированной скорости вентилятора происходит снижение расхода

пылевоздушной смеси и растет аэродинамическое сопротивление фильтра. При достижении уровня сопротивления 135 % от стартового значения происходит остановка побудителя расхода, и запускается счётно-решающее устройство для вывода результатов расчётов на дисплей.

На основании данного алгоритма на экспериментальной установке достигнута необходимая точность измерения концентрации пылевого аэрозоля.

Также однозначно установлено, что увеличение аэродинамического сопротивления фильтра и отношение к нему объема прокаченного воздуха однозначно определяют массовую концентрацию пылевого аэрозоля.

Далее были проведены исследования по влиянию влажности и дисперсного состава пылевого аэрозоля на результаты измерений.

Для исследований были выбраны марки углей Д, Ж, Г, К, породной пыли алевролита, смеси песчаника и алевролита, а также смеси угольной и породной пыли. Фракционный состав был определён как 0–45 мкм, 0–100 мкм, 0–200 мкм.

В таблице 4.9 приведены результаты различного времени набора пробы на фильтр при различных концентрациях пылевого аэрозоля и дисперсного состава.

Таблица 4.9 – Определение влияния вещественного состава и фракционного состава аэрозоля

Тип пыли	Концентрация пыли, мг/м ³	Погрешность измерения и абсолютное значение ошибки измерения для пыли фракции		
		< 45 мкм	< 100 мкм	< 200 мкм
1. Уголь марки Ж	2–100	6,7	5,4	6,4
		12,3	10,1	19,8
	100–300	5,9	6,9	4,3
		14,7	13,1	7,0
	300–500	7,0	5,2	7,7
		12,2	14,2	12,5
	500–700	4,3	5,1	4,8

Тип пыли	Концентрация пыли, мг/м ³	Погрешность измерения и абсолютное значение ошибки измерения для пыли фракции			
		< 45 мкм	< 100 мкм	< 200 мкм	
	700–1000	16,2	15,7	14,4	
		4,5	4,4	5,4	
		10,8	9,6	12,1	
		8,0	6,6	5,0	
	2. Уголь марки Д	2–100	12,4	96,4	14,3
			5,5	5,9	4,4
100–300		11,3	15,7	14,4	
		8,1	4,1	5,4	
300–500		16,2	13,2	12,5	
		4,1	2,7	4,5	
500–700		13,4	10,6	11,9	
		6,4	6,4	3,4	
700–1000		12,4	17,3	10,7	
		7,8	5,5	4,9	
3. Уголь марки К		2–100	13,8	11,9	12,0
			3,7	4,2	3,6
	100–300	19,0	12,3	11,7	
		6,1	4,1	5,9	
	300–500	10,8	10,7	11,6	
		4,3	3,3	4,8	
	500–700	14,4	17,4	14,8	
		5,6	5,5	7,1	
	700–1000	14,0	11,6	13,9	
		3,7	5,5	6,0	
	4. Уголь марки Г	2–100	13,1	15,5	16,4
			6,2	4,5	4,9
100–300		18,8	13,8	12,4	
		4,1	5,7	3,6	
300–500		10,2	11,1	11,2	
		3,8	4,9	3,0	
500–700		12,3	9,7	14,5	
		8,1	7,0	5,3	
700–1000		15,0	13,4	12,0	
		5,8	5,7	4,0	
5. Алевролит		2–100	13,5	10,6	12,4
			3,3	4,8	4,9
	100–300	12,3	10,5	11,9	
		7,7	5,5	7,2	
	300–500	17,7	15,0	13,5	

Тип пыли	Концентрация пыли, мг/м ³	Погрешность измерения и абсолютное значение ошибки измерения для пыли фракции		
		< 45 мкм	< 100 мкм	< 200 мкм
	500–700	7,0	4,0	6,3
		14,5	106,1	11,0
	700–1000	4,0	5,7	4,7
		12,5	12,7	12,5
6. Аргиллит	2–100	3,9	4,0	3,9
		10,5	12,5	13,5
	100–300	5,6	4,7	5,8
		16,1	12,3	14,3
	300–500	6,6	5,2	4,8
		15,0	14,3	11,3
	500–700	4,4	5,8	6,0
		12,4	10,9	12,2
700–1000	5,7	4,7	5,4	
	9,7	9,7	10,3	
7. Песчаник	2–100	5,0	3,6	5,3
		20,6	12,2	14,4
	100–300	7,7	5,6	5,4
		10,2	10,8	11,4
	300–500	3,9	4,0	3,9
		12,3	10,1	17,6
	500–700	6,6	7,1	7,4
		13,7	11,9	19,6
700–1000	5,1	4,6	5,3	
	11,6	10,2	16,5	
8. Уголь марки Д + Аргиллит	2–100	8,2	6,4	6,2
		11,9	13,8	14,1
	100–300	5,1	6,0	8,9
		20,4	10,7	13,8
	300–500	3,3	3,9	3,4
		7,9	7,7	9,6
	500–700	6,1	5,1	5,5
		11,7	17,4	11,3
700–1000	4,1	6,1	5,7	
	10,8	19,8	12,2	

Изложенные выше исследования по влиянию дисперсного состава показывают, что относительная и абсолютная ошибки обусловлены

погрешностями весового метода и экспериментальной установки и не носят характер закономерностей.

Для определения степени влияния влажности прокачиваемой пылегазовой среды на фильтрующий элемент экспериментальная установка помещалась в пылевую камеру, в которой создавалась определённая влажность и температура, во время эксперимента контролировалось изменение веса фильтровального элемента, а также изменение скорости фильтрации на чистом воздухе.

Результаты исследования приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Исследование влияния влажности воздуха на аэродинамическое сопротивление фильтра

m_1 , мг	m_2 , мг	t , мин	H , %	Q , дм ³ /мин	T , °С
79,2	79,5	3	0,5	14,78	22
79,3	79,5	11	85	14,82	6
79,3	79,8	14	70	14,83	23
79,3	79,9	21	78	14,34	34
79,3	79,4	31	94	14,71	21

Показано, что скорость пылегазового потока через фильтровальный материал не зависит от температуры и влажности.

Проведенные экспериментальные исследования позволили сформулировать требования к техническому устройству для контроля запыленности воздуха.

4.2. Техническое устройство для реализации методики измерения концентрации пылевого аэрозоля

Приведём основные требования к техническому устройству, реализующему методику измерения, изложенную ранее.

Техническое устройство должно иметь в себе все элементы экспериментальной установки, а также дисплей для индикации результатов измерений и автономный блок питания.

Вес устройства не должен превышать 1500 граммов.

Прибор должен иметь запас электроэнергии для питания вентилятора и электроники для проведения измерений в течение смены непосредственно в шахте.

После модификации экспериментальной установки и разработки электронного блока управления был разработан корпус, непосредственно вмещающий в себя все элементы экспериментальной установки [221, 222].

Вид технического устройства приведен на рисунке 4.8.

На рисунке обозначено: 1 – фильтрующий элемент; 2 – магнитный держатель фильтра; 3 – колесо центробежного вентилятора; 4 – датчик расхода газа; 5 – система контроля выхода воздуха из устройства; 6, 9 – корпусные крышки устройства; 7 – элементы электропитания устройства; 8 – электронная плата со счётно-решающим устройством; 10 – дисплей устройства; 11 – электродвигатель центробежного вентилятора.

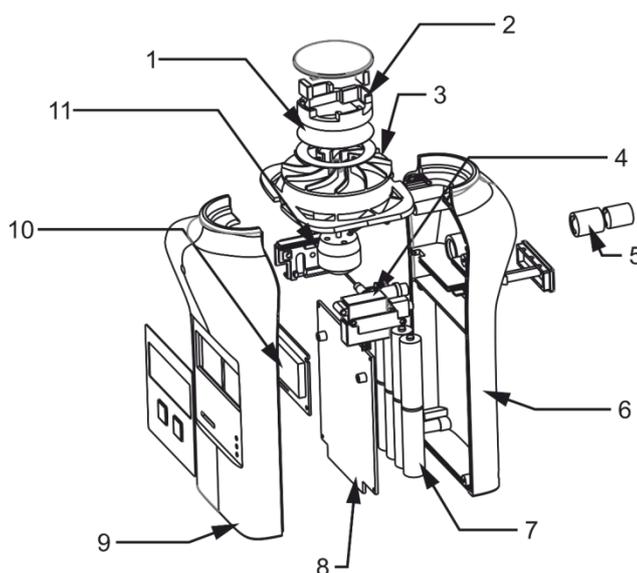


Рисунок 4.8 – Техническое устройство для реализации экспресс-контроля пылевой обстановки в угольных шахтах

Конструкция экспериментальной установки, а также разработанное встроенное программное обеспечение [222] 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. Техническое устройство получилось весом 950 граммов, со временем измерения, не превышающим 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 основании данной методики могут быть разработаны приборы для проведения экспресс-оценки пылевой обстановки в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. Отличительными особенностями таких приборов могут быть: проведение измерения и индикации результатов непосредственно в точке измерения, отсутствие дополнительных калибровок прибора на точке измерения, малое время измерения – до 3-х минут, что позволяет измерять высокие и низкие массовые концентрации пылевого аэрозоля.

При разработке экспериментальной установки и технического устройства было учтено, что прибор должен иметь необходимые разрешения на применения в шахтах, опасных по взрывам метана и угольной пыли [223–225].

В дальнейшем было освоено серийное производство и распространение данного прибора на шахтах для целей санитарного и технологического контроля, данный прибор также поставлялся в лаборатории для проведения специальной оценки рабочих мест. Сертификат соответствия ЕАЭС RU C-RU.MГ07.B.00036/19 до 23.04.2024 г. Свидетельство об утверждении типа средства измерения RU.C.31.001.A № 44869 до 16.11.2021 г.

По нашим оценкам, используя количество поставленных одноразовых фильтров, количество измерений данным прибором с начала поставок составляет около 1 млн.

Эксплуатация приборов показала, что методика, положенная в основу принципа измерения, является надежной и точной для контроля состояния условий труда по пылевому фактору.

Выводы по главе

1. Разработанная 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.

2. 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.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВИТАЮЩЕЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ВОЗДУХЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ

5.1. Обзор методик к организации непрерывного контроля витающей угольной пыли

Безусловно на угледобывающих шахтах всегда имеется потенциально взрывоопасная среда, прежде всего, из-за наличия метана и угольной пыли во взвешенном состоянии.

Зачастую нарушение ведения правил горных работ приводит к возникновению аварийной ситуации – взрыву, который влечет за собой не только разрушения, но и травмирование работников, находящихся в зоне поражения. Нижний предел взрываемости, устанавливаемый по измерению зольности, выхода летучих, влажности и дисперсности, обычно составляет 10 – 25 г/м³. Также на степень взрывчатости пыли влияет содержание метана в атмосфере горных выработок, при увеличении доли метана до 2 % происходит снижение нижнего предела взрываемости угольной пыли до 10 г/м³, далее при увеличении концентрации до 3 % предел взрывоопасного содержания снижается до 5 г/м³.

Исходя из этого, комплексный контроль концентрации метана и угольной пыли в воздухе горных выработок является первостепенной задачей систем аэрогазового контроля. Данная задача начала решаться еще в советское время, шахты оснащались переносными и стационарными средствами контроля рудничной атмосферы. Разработкой различной аппаратуры, а также методов и методик для проведения контроля рудничной атмосферы занимались научно-исследовательские институты, в том числе ВостНИИ, а также организации, связанные с горной добычей.

Были разработаны и запущены в промышленную эксплуатацию несколько наборов стационарной аппаратуры для контроля атмосферы горных

выработок, для контроля метана аппаратура серии ИМ, АМТ, для контроля скорости воздуха комплекс «Метан» и «Воздух».

После 1992 года из-за недостатка финансирования и закрытия многих институтов основная нагрузка по разработке систем для подземной добычи перешла в малые предприятия, такие как ООО «НТЦ ИГД», НПП АТБ и ООО «Фирма «Аэротест»,

Затем стали появляться такие научно-производственные предприятия, как: в г. Екатеринбурге – ООО «Ингортех», в г. Новосибирске – ТОО «Научно-производственная фирма Грач», в г. Смоленске – ФГУП «Смоленское производственное объединение «Аналитпрбор». Они приступили к созданию приборов контроля аэрогазового состояния в горных выработках шахт нового поколения.

На начало исследований применяемые системы, осуществляющие аэрогазовый контроль, выполняли следующие функции: измеряли содержание метана и угарного газа в местах установки стационарных датчиков, автоматически отключали электрооборудование при превышении концентрации измеримых газов, контролировали работоспособность вентиляторов местного проветривания, контролировали работоспособность главных вентиляторных установок, контролировали положение дверей вентиляционных шлюзов, имелась возможность телеуправления оборудованием.

Несмотря на то, что применяемые на угледобывающих предприятиях страны системы аэрогазового контроля отвечают требованиям стандартов России, гармонизированы с международными стандартами, применение на угольных шахтах новых портативных групповых и индивидуальных метанометров не исключает взрывов метана и угольной пыли при ведении горных работ [228].

В существующих на начало исследований системах АГК не предусматривалось установка датчиков контроля массовой концентрации

угольной пыли, системы ограничивались контролем метана, угарного газа и скорости воздушного потока.

Возникла проблема – отсутствие в системах АГК датчиков контроля витающей угольной пыли.

Кроме того, нормативные документы по аэрогазовому контролю, до введения приказом Ростехнадзора России от 1 декабря 2011 года № 678 «Положения об аэрогазовом контроле» [226], не требовали непрерывных замеров витающей в воздухе и отложившейся пыли в горных выработках.

В соответствии с Положением [226] на каждой угольной шахте организуется непрерывный автоматический контроль за параметрами рудничной атмосферы, содержанием пыли и расходом воздуха в горных выработках.

Одной из составных частей многофункциональных систем безопасности угольных шахт является организация системы аэрологического контроля (АГК), обеспечивающая контроль в оперативном режиме реального времени за соблюдением мер, направленных на предотвращение условий создания опасностей для шахтеров аэрологического характера, реализацию противоаварийного управления и защиты людей, материальных ценностей.

В статье [227] приведены результаты многолетнего комплекса лабораторных и шахтных исследований, по результатам которых изучены закономерности интенсивности пылеотложений по сети горных выработок в угольных шахтах Кузбасса. Установлены специфические различия в распределении дисперсных составов отложившейся угольной пыли для каменных углей разной стадии метаморфизма. Также установлены различия в характере распределения интенсивности пылеотложений по горным выработкам на разных участках. Приведены результаты разработки алгоритма определения величины интенсивности пылеотложения от одного источника интенсивного пылевыведения до следующего на основе измерения концентрации витающей пыли, распределения дисперсного состава витающей пыли, влажности, температуры, скорости движения воздуха. Проведенные

теоретические исследования позволили разработать средство автоматического контроля запыленности шахтной атмосферы и интенсивности пылеотложений на основе оптического метода малых углов рассеяния с применением нескольких приемников оптического излучения, расположенных под разными углами, что позволило с минимальной погрешностью измерения не только регистрировать концентрацию витающей пыли, но и увеличить видимый спектр размеров частиц до диапазона 0–150 мкм, и дало возможность для практического осуществления мгновенного анализа дисперсного состава витающей пыли, необходимого для расчета интенсивности пылеотложений до следующего источника интенсивного пылевыделения.

Научно доказано резкое увеличение поступления витающей в атмосфере горных выработок тонких фракций пыли, интенсивность ее отложения при увеличении нагрузок на очистной забой, что приводит к росту профессиональных заболеваний работников пылевой этиологии и риску формирования взрывоопасной обстановки на рабочих местах угольных шахт.

Проведенные исследования подтверждают, что с увеличением количества тонких фракций при интенсификации работ и вводе современного горно-шахтного оборудования в эксплуатацию, а также повышенной взрываемости угольной пыли тонких фракций возрастает важность автоматического непрерывного контроля дисперсного состава пылевого аэрозоля, а также уровня пылеотложения на протяжении горных выработок.

Таким образом, научными исследованиями доказано, что контроль запыленности с учетом дисперсного состава витающей пыли должен быть не периодическим, а постоянным, назрела необходимость проведения постоянного автоматического мониторинга состояния атмосферы, пылевзрывобезопасности горных выработок с автоматической выдачей управляющих команд на управление механизмами пылеобразования, пылеподавления, а также изменяющих режимы работы устройств, вызывающих пылеподавление [228].

Постоянный автоматический мониторинг в местах пылеобразования и контроль пылевой обстановки на рабочих местах дает возможность оперативно, в реальном времени, получать объективную информацию о состоянии пылевзрывобезопасности угольной шахты, эффективно управлять безопасностью технологических процессов при ведении горных работ, вовремя принимать исчерпывающие меры по предупреждению аварийных ситуаций, снижать уровень воздействия вредного производственного фактора – пыли, предотвращать случаи профессиональных заболеваний органов дыхания и травмирования работников. Разработка методики измерения массовой концентрации витающей угольной пыли в воздухе рабочей зоны в автоматическом непрерывном режиме и создание средств автоматического контроля интенсивности пылеотложения в горных выработках угольных шахт является актуальной научной задачей.

Решение этой задачи и организация непрерывного контроля и автоматического постоянного мониторинга состояния витающей угольной пыли в атмосфере горных выработок и мониторинга пылевзрывобезопасности горных выработок с автоматической выдачей управляющих команд способствует снижению уровня аварийности, травматизма, профессиональной заболеваемости шахтеров.

В работе [229] отмечается что, «для совершенствования системы управления охраной труда, снижения риска профессиональных заболеваний, аварийности, связанной со взрывами метана и угольной пыли, предлагается усовершенствование приборной базы автоматизированного контроля за пылевой обстановкой на угольных шахтах, создание систем, не только измеряющих концентрацию пыли в воздухе рабочей зоны, но и определяющих дисперсный состав, а также пылеотложение в выработках. Системы, регистрирующие дисперсный состав витающей пыли, позволят получать развернутую картину по работе систем пылеподавления, концентрации респирабельной и крупной фракций пыли, а также пылеотложению на протяжении горных выработок, что даст возможность более объективно

оценивать состав воздуха рабочей зоны, проводить расчет пылевой нагрузки с учетом дисперсного состава.

Интеграция этих приборов в общую сеть автоматизации шахты позволит проводить непрерывный автоматический мониторинг респираторной фракции пыли, снизить профессиональные риски».

Для поиска решения проблемы непрерывного автоматического измерения концентрации пыли в воздухе горных выработок проведем анализ существующих методик решения данной проблемы.

Предварительно выберем из общего числа методик, в том числе и рассмотренных ранее, те методики-кандидаты, которые наиболее подходят для модернизации. Данные методики должны иметь наиболее высокий потенциал к автоматизации и максимальному снижению трудозатрат персонала, а в самом лучшем случае полностью быть необслуживаемыми приборами длительный период времени. В связи с этим для модификации отпадают различные методики, требующие прямого участия человека: практически все весовые методы, а также методы с предварительным осаждением пыли на промежуточный носитель.

В качестве методик-кандидатов были рассмотрены следующие методы: трибоэлектрический, электроиндукционный, ультразвуковой и оптический.

Трибометрические методы. Если два различных материала контактируют между собой трением, возникает эффект обмена электронами, выражающийся в возникновении разности электрических зарядов на поверхности материалов. Данная разность зарядов может быть измерена с использованием современного электронного оборудования; по уровню заряда, возникшего на одном электроде, можно судить о количестве частичек пыли, вступивших в контакт с электродом. Существует разновидность трибоэлектрической методики, измеряющей частоту столкновения частиц с электродом, а не уровень заряда индуцированного на электродом.

Данная методика имеет серьезный недостаток при проведении измерений, существенное влияние влажности воздуха и скорости движения частиц, а также химических и механических свойств пыли.

Пьезоэлектрический метод в модификации измерения ударного воздействия частичек пыли на пьезоэлектрический сенсор [508, 509]. Данному методу свойственны следующие недостатки: нелинейная чувствительность и избирательность к частицам крупного размера, низкая общая чувствительность метода.

Электроиндукционный (электрический) метод – разновидность метода без выделения дисперсной фазы на промежуточный носитель. Основан на периодическом принудительном заряде частиц пыли в поле коронного импульсного разряда и последующем измерении тока переноса заряженных частиц путем определения наведенного ими переменного напряжения. Амплитуда напряжения пропорциональна массовой концентрации пыли [231, 232]. Путем сложного математического обеспечения и принимаемых технических мер при заряде частичек пыли, возможна компенсация части факторов, влияющих на точность измерения концентрации, однако на данный момент полное исключение влияния паразитных внешних факторов исключить невозможно.

Важный недостаток данного метода – невозможность, при существующем уровне развития техники, создавать взрывобезопасный прибор для использования в угольных шахтах.

Ультразвуковой/акустический методы – измерение изменений при прохождении звуковых (ультразвуковых) волн через запыленный объем. Отличается низкой чувствительностью ($100\text{--}900\text{ г/м}^3$), а также высокой чувствительностью к различным внешним факторам среды: температуры, давлению, влажности [214–217, 232, 233].

Оптические методы можно разделить на следующие: интегрального светорассеяния, голографические, лазерного измерения, абсорбционный. Рассмотрим данные методы более подробно.

Метод интегрального светорассеяния [235–237] позволяет проводить измерения витающей пыли в воздухе, используя группу фотоэлементов, собирающих отраженное от пылевого аэрозоля оптическое излучение. Используя различное расположение фотоэлементов, можно получать данные не только о массовой концентрации пыли, но и об ее дисперсном составе. Данный метод позволяет измерять низкие, порядка 1 мг/м^3 , и высокие концентрации пыли – до 1500 мг/м^3 . Использование лазерного излучателя в данных пылемерах позволяет резко улучшить их характеристики, снизив уровень измеряемой концентрации приборами до 1 мкг/м^3 . Одной из разновидностей оптического метода является использование эффекта Тиндаля [238], данный метод позволяет разработать высокочувствительные пылемеры минимальных габаритов для измерения сверхмалых концентраций пыли. Данный эффект применяется во многих промышленно производимых пылемерах по всему миру.

Разновидность оптического метода – метод счета частиц – для измерения малых концентраций пыли в различных помещениях, а также в атмосферном воздухе, в котором используется специальная система, позволяющая подавать в измерительный объем заранее известное количество частиц. Далее регистрируется рассеянный свет, собранный фотоприемниками, расположенными в счетном объеме, и по результатам анализа выдается не только количество частиц, массовая концентрация, но и дисперсный состав.

Другая разновидность оптических методов, основанных на измерении ослабления пройденного оптического излучения через измеряемую среду, называется нефелометрическим [522] методом измерения. В общем случае измеряется прохождение излучения под определёнными углами с последующим расчетом массовой концентрации частиц. Используются стандартные углы 45, 90, 135 градусов.

Наиболее технически совершенным является голографический метод, основанный на получении голограмм Фраунгофера. В данном методе в измерительные камеры частицы пыли освещаются лазерным зондирующим

пучком, а отраженное оптическое излучение записывается на голограмме, при этом происходит фактическое «увеличение» записываемого изображения. Далее изображение восстанавливается с полученной голограммы и проецируется на экран, после чего происходит считывание количества частиц, а также их размеров. Увеличение может достигать 250–300 раз, что позволит точно оценить форму и размер частицы. Данный метод позволяет оценить не только количество частиц и их форму, но и положение в пространстве.

Также метод подходит для измерения концентрации частиц, находящихся в быстром движении, так как его особенностью является время экспозиции зондирующего пучка – до 10 нс [240].

Различные оптические методики в настоящее время хорошо сочетают простоту изготовления измерительных приборов, мощное методологическое обеспечение и поэтому получают все большее распространение, это также подтверждается достаточно большим удельным весом публикаций, касающихся оптических методов в различной научно-технической литературе.

Кроме достоинств у оптического метода есть определённые проблемы: требуются первоначальные данные о физико-химических свойствах пыли, размерах частиц, показателе преломления и коэффициенте поглощения. Также следует принимать во внимание возможность изменения состава измеряемого вещества.

В случае если необходимые данные могут быть получены и использованы в методике, то оптический метод становится очень удобным и перспективным.

Предварительно сформулируем требования к разрабатываемой методике:

1. Результат измерения концентрации пыли в воздухе предприятия с использованием разрабатываемой методики должен выдаваться в общепринятых единицах – мг/м³.

2. Методика должна работать в диапазоне дисперсного состава до 100 мкм с преобладанием в дисперсном аэрозоле фракций ~ 10 мкм, как это было показано в главе 2.
3. Методика должна иметь минимальное время задержки между началом измерения и получением результата.
4. Методика должна иметь возможность автоматизации либо работать без вмешательства человека.
5. Методика должна быть работоспособна в большом диапазоне уровней запыленности, встречающихся на угольных предприятиях.
6. Методика должна использовать изокинетические способы пылеулавливания [241] в рабочей камере измерителя.

После проведенного аналитического исследования различных методик непрерывного автоматического контроля концентрации пыли наиболее подходящей методикой, несмотря на существующие недостатки, описанные выше, считаем оптическую методику. Далее в разработке новой методики постараемся снизить влияние негативных факторов на точность измерения, а также полностью воспользоваться всеми преимуществами оптического измерения концентрации пыли.

В настоящее время в год регистрируется порядка 50–100 заявок на различные полезные модели и изобретения оптических пылемеров.

Разработка методики для измерения пыли оптическим методом

В общем случае разделим оптические измерители на одно- и многоканальные. Под многоканальными будем подразумевать двуканальный метод.

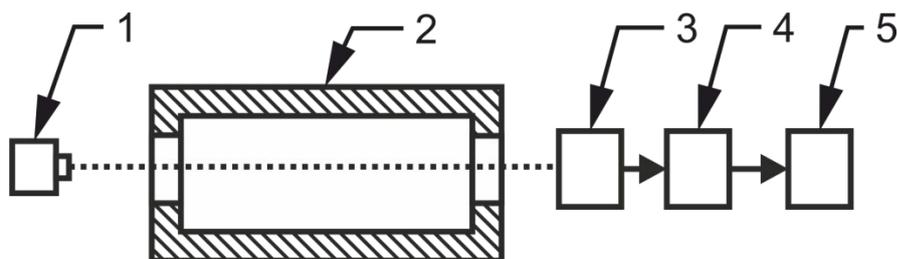


Рисунок 5.1 – Схема однолучевого оптического пылемера

В одноканальных системах, рисунок 5.1, оптическое излучение из источника (1) проходит через измерительный объем (2), содержащий газопылевой поток, и ослабляется, далее оптическое излучение попадает на фотоприёмник (3). Выходной сигнал с фотоприёмника попадает на усилитель (4), различные виды преобразователей, далее – в счетно-решающее устройство (5), которое формирует сообщение об уровне запыленности.

Существенным недостатком данных систем является невозможность контроля параметров излучающей части пылемера, что приводит к ухудшению точности измерения, «дрейфу нуля». В то же время конструкция одноканального пылемера обладает простой оптической и электронной схемой, что при решении проблем контроля оптического излучения делает данную методику измерения удобной для реализации в виде технического устройства [242].

Для решения проблем старения генераторов оптического излучения, а также фотоприемных устройств возможно применение двухканальных систем, схема данного устройства представлена на рисунке 5.2.

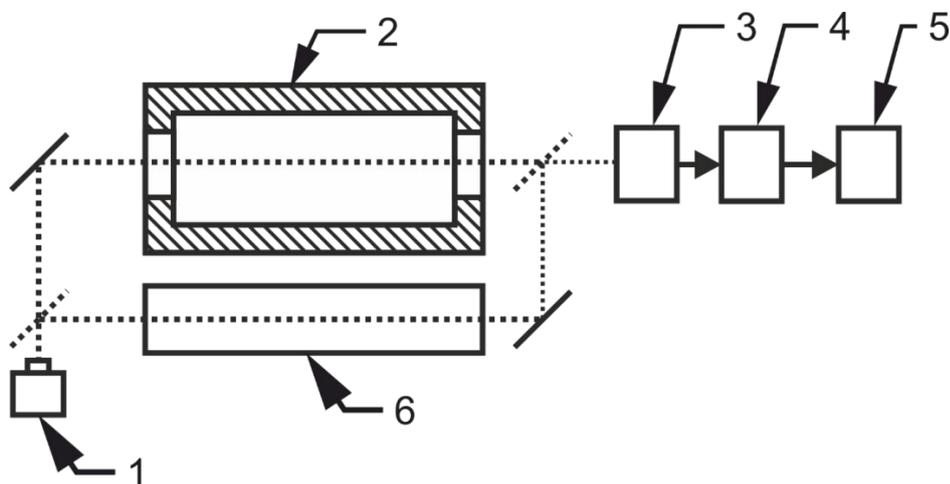


Рисунок 5.2 – Двухканальный оптический пылемер

В двухканальных оптических пылемерах используется схема, позволяющая снизить погрешность измерения, появляющуюся за счет влияния нестабильности питания и старения фотоприемного устройства и излучателя. Данный пылемер характеризуется лучшим удержанием «нуля».

На рисунке 5.2 приведена схема работы двухлучевого пылемера. Оптическое излучение, испускаемое источником (1), расщепляется на два потока с помощью полупрозрачного зеркала. Один из потоков проходит через измерительную камеру (2) с газопылевым потоком и попадает в приёмное устройство (3). Другой поток излучения проходит через камеру (6) с газовым составом, аналогичным газовому составу, находящемуся в измерительной камере (2), но в котором отсутствуют частицы пыли. Далее излучение попадает в тот же фотоприёмник (3). Далее сигнал попадет на усилитель (4) и счетно-решающее устройство (5). Данная схема, сравнивая сигнал, прошедший через измеряемую среду, и сигнал, прошедший через аналогичную по составу газовую среду, но не имеющую частичек пыли, выдает результаты, основываясь на разнице данных сигналов. В этой схеме исключено влияние старения на критически важные элементы для проведения точного измерения. К сожалению, данная методика измерения имеет на порядок более высокую сложность при реализации на практике. Использование большого количества оптических элементов усложняет сборку и юстировку системы в целом.

В связи с возрастающими затруднениями при производстве приборов со сложной оптической схемой остановим рассмотрение оптических пылемеров на данном этапе, хотя при подготовке к разработке экспериментальной установки были рассмотрены такие виды оптических пылемеров, как:

- оптико-электронные пылемеры с оптической компенсацией [243–245];
- многоволновые оптико-электронные пылемеры [246, 247];
- оптические пылемеры, измеряющие рассеянное оптическое излучение.

Варианты исполнения с одним или двумя каналами, а также с использованием различных компенсационных схем;

- приборы, основанные на эффекте Тиндаля. Особенность данных приборов – открытая измерительная камера [238];
- счетчики частиц, использующие взаимодействие электромагнитных полей излучателя, и частицы, описываемые уравнениями Ми, с различными

углами отбора излучения из измерительного объема [248]. Углы могут изменяться от 0 до 90.

Также все рассмотренные оптические пылемеры могут быть подразделены по источникам излучения: лампы накаливания различного вида, полупроводниковые излучатели (светодиоды), различные виды лазеров. В настоящее время в связи с резким прогрессом в полупроводниковой электронике одним из самых перспективных генераторов оптического излучения, в том числе и в инфракрасной области, является полупроводниковый лазер.

Использование лазерных излучающих систем позволяет проводить не только контроль пылевой обстановки на наибольших расстояниях, но и оптическое зондирование атмосферы, для чего широко используется эффект обратного рассеяния, обнаруживая источники пылеобразования на расстоянии до 10 км.

5.2. Разработка экспериментальной установки

При проектировании различных оптических систем пылемеров с заранее определенными условиями эксплуатации желательно уже на первоначальных стадиях прибегнуть к экспериментальному созданию физической установки [532]. На данной стадии разрабатывается макет прибора для проведения испытаний в промышленных условиях.

В случае разработки методики и на ее основании экспериментальной установки для проверки работоспособности прибора в условиях угольных шахт, опасных по взрывам пыли и газа, могут возникнуть серьезные трудности с получением необходимых разрешительных документов, а также проведением необходимой сертификации перед испытаниями. Для того чтобы избежать испытаний экспериментальной установки при разработке методики испытания проводились на установке УПП-1, рисунок 5.3.

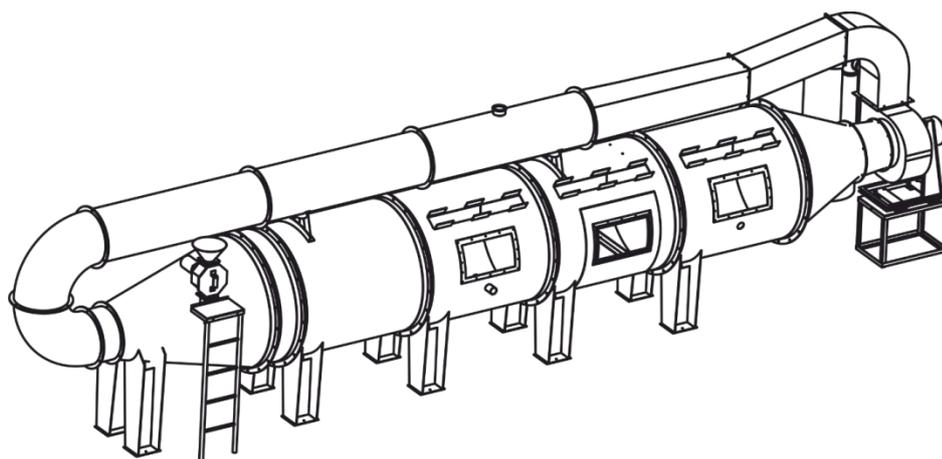


Рисунок 5.3 – Установка создания пылевого аэрозоля УПП-1

Использование установки позволяет решить следующие проблемы:

1. На этапе физической разработки экспериментальной установки возможно оперативное испытание параметров разрабатываемой установки.
2. Возможность установления и поддержания необходимых уровней запылённости для проведения тестирования и калибровки экспериментальной установки.
3. Для испытаний экспериментальной установки не требуется получения разрешающих документов.

В связи с вышеизложенным для проектирования экспериментальной установки был применен комплексный подход: с одной стороны, проводилось создание математической модели для разрабатываемой методики и измерения пыли в автоматическом режиме, с другой стороны, разрабатывалась физическая модель экспериментальной установки для испытаний в условиях, приближенных к промышленной эксплуатации.

Математическая модель разрабатываемой экспериментальной установки позволит решить следующие проблемы:

- 1) Сократить время для подготовки математических алгоритмов расчета концентрации пыли.
- 2) Обеспечить измерение разных видов угольной пыли.

3) Моделировать работу частей изготавливаемой экспериментальной установки.

В общем случае при разработке методик измерения концентрации пыли используются модификации методов измерения, связанных с измерением ослабленного или рассеянного излучения.

Большой вклад в изучение данных процессов и реализацию измерительных систем на их основе внесли Надежденский А.И., Рудин В.Л., Горелик Д.О. [250–252].

В 1908 году было опубликовано решение задачи рассеяния электромагнитного излучения частицами, полученное на основе теории электромагнитного поля Максвелла. Данный подход позволяет получить аналитическое решение, так как основывается на классическом математическом анализе. Далее в этом направлении были опубликованы работы Шифрина К.С. [253], Вад де Хюлста [254] и т. д., затем были опубликованы решения для полидисперсных систем – таблицы Шифрина К.С. и Зельмановича И.Л., Яновицкого Э.Г., Думанского Э.О. [255–256].

С развитием методов решения для теории Ми были опубликованы алгоритмы решения уравнений для использования при вычислениях на различных ЭВМ.

При использовании теории Ми описываемые процессы ослабления и рассеяния излучения имеют следующие ограничения:

- источник света монохроматический и имеет заданную длину волны;
- поток излучения формируется из параллельных лучей;
- в измерительном объеме находятся частицы шарообразной формы, находящиеся на достаточном расстоянии, чтобы можно было пренебречь эффектами самоосвещения;
- частицы имеют известные оптические параметры;
- среда в измерительном объеме изотропна.

Приведем параметры, следующие из теории Ми, от которых зависит поведение среды в измерительном объеме разрабатываемой экспериментальной установки:

- отношение радиуса частицы r к длине световой волны λ : обычно используют параметр α , равный отношению длины окружности частицы к длине волны света $\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$;
- комплексного показателя преломления в случае если частица поглощает свет;
 - угла θ между направлением падающего и рассеянного света;
 - количества частиц в измеряемом объеме.

Следует отметить, что в описании процессов рассеяния и поглощения света в прямом виде не входит весовая концентрация частиц, а также не учитываются физические свойства пыли. Все это приводит к требованию разработки математической модели для проведения измерений на экспериментальной установке.

Для решения задач по разработке экспериментальной установки следует решить следующие подзадачи:

1. Создать математическую модель разрабатываемой экспериментальной установки.
2. Создать физическую модель экспериментальной установки.
3. На основании проведенных исследований математической модели на экспериментальной установке провести корректировку модели, а также определить параметры модели, зависящие от свойств экспериментальной установки.

Для проведения исследований на основании предварительного изучения вопроса была разработана принципиальная электрическая схема, использующая два излучателя оптического излучения, а также два фотоприемных элемента.

Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 5.4.

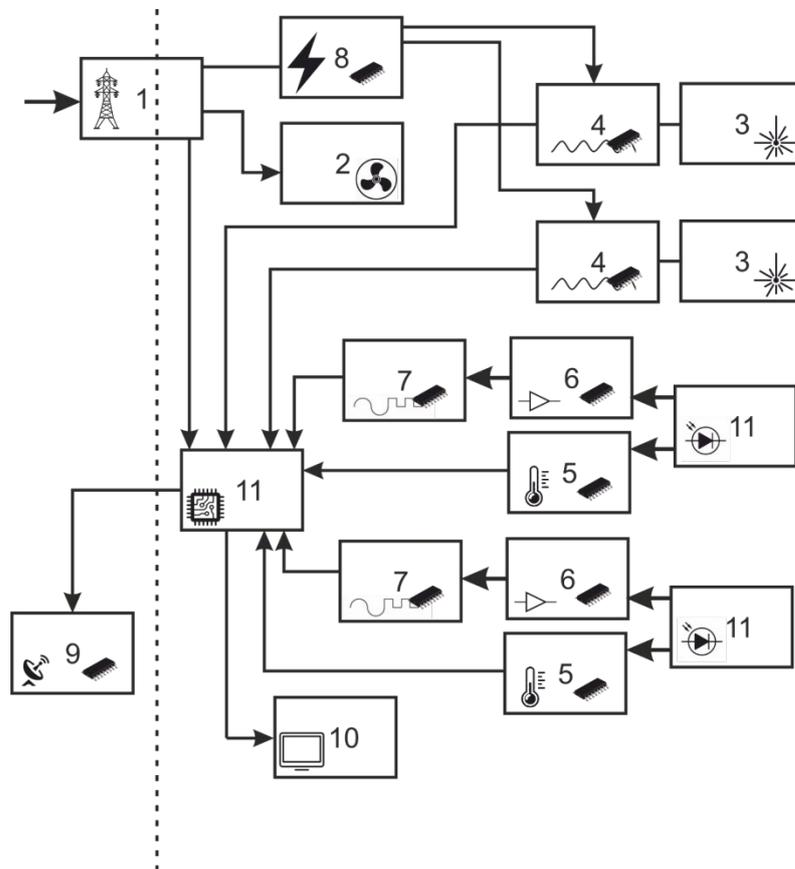


Рисунок 5.4 – Блок-схема экспериментальной установки

Элементы экспериментальной установки:

1. Искробезопасный блок питания.
2. Компрессор.
3. Оптический излучатель.
4. Схема контроля мощности оптического излучения.
5. Схема контроля температуры фотоприемного устройства.
6. Трансимпендансный усилитель фотоприёмника.
7. Аналого-цифровой преобразователь.
8. Стабилизатор питания усилителя.

9. Формирователь сигналов внешних интерфейсов.
10. Дисплей.
11. Управляющее счетно-решающее устройство (рисунки 5.6–5.7).
12. Фотоприёмное устройство (рисунок 5.5).

Для экспериментальной установки были изготовлены различные виды фотоприёмников.

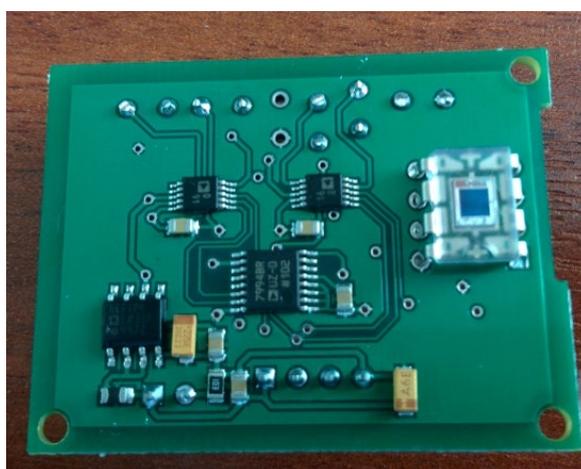
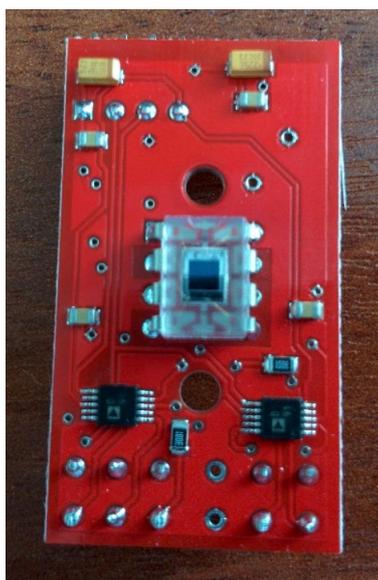


Рисунок 5.5 – Фотоприёмники для экспериментальной установки

Электронные платы управления экспериментальной установкой построения измерителей пыли представлены на рисунках 5.6, 5.7.

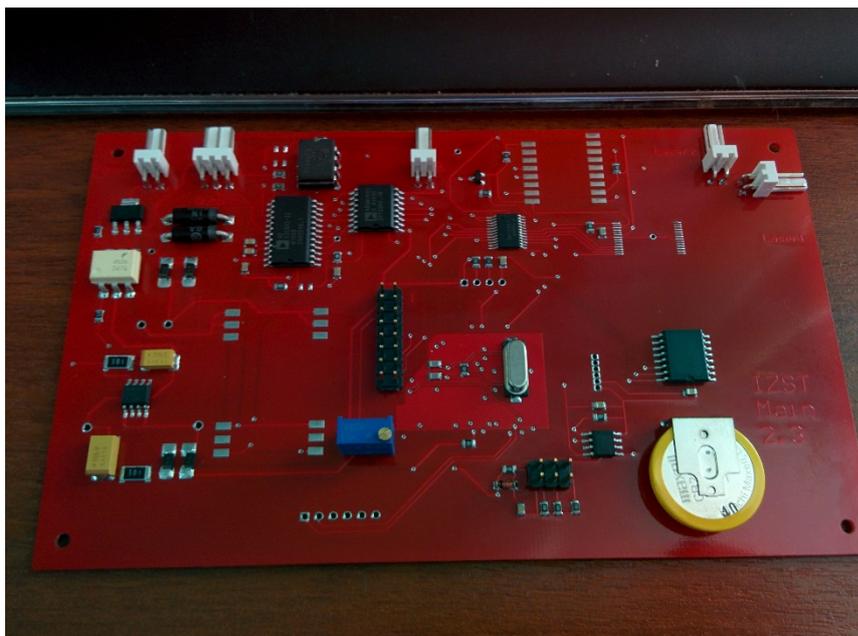


Рисунок 5.6 – Плата сбора данных экспериментальной установки



Рисунок 5.7 – Плата передачи данных экспериментальной установки

Для решения проблемы оседания пыли рассматривались следующие варианты решений:

1. Введение дополнительной автоматической коррекции в расчётную модель на основании оценки запыления смотровых окон.

2. Обдув чистым воздухом поверхности защитных стекол фотодатчиков.
3. Нагрев поверхности стекол для получения конвективных потоков воздуха, предотвращающих оседание пыли на оптические элементы.

Рассмотрим вариант защиты оптического элемента – защитного стекла, устанавливаемого перед фотоэлементом с помощью нагрева. Для нагрева защитного стекла возможно применение двух методов: нанесение специального токопроводящего покрытия с подведением электрического тока либо косвенный обогрев стекла от нагревательного элемента, расположенного в корпусе прибора. Из публикации [257] установлено, что разность температур между окружающей средой и защищаемым элементом, при которой возникают устойчивые конвекционные потоки, надежно защищающие оптические элементы на поверхности прибора, составляет 200°C , что при принятой максимальной эксплуатационной температуре в шахте потребует нагрева защитного стекла до 235°C . В общем случае нагрев до такой температуры элементов оптического прибора резко поднимает требования к конструкции прибора, конструкции оптического тракта прибора. Также у приборов, использующих данную систему, резко возрастает потребляемая мощность. Потребляемая мощность данного теплового элемента начинает зависеть от параметров окружающей среды – скорости движения воздуха, влажности и температуры. Более того, согласно [223], действующего на момент разработки данной экспериментальной установки, в соответствии с пунктом «5.1. Максимальная температура поверхности», максимальная температура поверхности принималась равной 150°C , данное ограничение связано с тем, что во время отключения экспериментальной установки (прибора) от сети электроснабжения возможно образование слоя угольной пыли на поверхности оптического элемента, что может привести к неблагоприятным последствиям после включения системы обогрева стекла. Исходя из вышесказанного, считаем, что система удаления пылеотложения на

оптических поверхностях с использованием различных режимов подогрева защитного стекла не может быть применена в экспериментальной установке.

Рассмотрим вариант введения дополнительной коррекции показаний фотоприемника либо изменения мощности излучателя. Для реализации данного варианта следует выбрать схему, использующую дополнительный канал измерения запыленности защитных оптических элементов либо проведения коррекции, основываясь на показаниях основной измерительной схемы.

Рассмотрим схему с дополнительными фотодатчиками.

При введении в оптическую схему дополнительного фотодатчика, реагирующего на запыление стекол, защищающих фотоприёмник и излучатель по степени отражения излучения от осевшей пыли, в расчётное устройство может передаваться информация, используя которую, система откорректирует расчёт массовой концентрации пыли. Также с использованием данной информации в каналы управления мощностью оптического излучателя может передаваться команда об увеличении излучаемой мощности для компенсации поглощающих свойств пыли, осевшей на защитном стекле. Аналогичная команда выдается и на усилитель фотоприемного устройства, позволяющего увеличить коэффициент усиления.

Коррекция мощности в многолучевых схемах без использования дополнительных фотоприёмников, к сожалению, хоть теоретически и возможна, реализация ее в виде экспериментальной установки резко усложняет конструкцию оптической части, нивелируя все возможные преимущества. Использование схемы двойного прохода через защитные стекла, что создаёт частичное поглощение излучения осевшим слоем пыли, технически неоправданно при создании экспериментальной установки. Далее рассмотрим вариант защиты оптических элементов, связанный с обдувом защищаемых поверхностей чистым воздухом.

Данные системы были известны ранее [540, 541] и применялись в системах измерения концентрации пыли в газотоках различных труб.

В разрабатываемой экспериментальной установке применен отличающийся подход обдува воздухом. Благодаря развитию полупроводниковой промышленности стало возможным резко уменьшить габариты как излучателя, так и приёмников излучения, эта особенность позволила сократить суммарную площадь, требуемую к защите, до 5–10 мм².

Развивая идеи о сокращении площади элементов, на которых возможно пылеоседание, для экспериментальной установки была разработана следящая конструкция защиты оптических элементов. В данной конструкции отсутствуют элементы, расположенные между пылевоздушным потоком и фотоприёмником, за исключением интерференционного светофильтра, являющегося частью фотоприёмника. Расположенный вне блока фотоприёмника маломощный компрессор, забирая воздух из протекающей пылевоздушной смеси, направляет его на блок фильтров для отчистки от пыли, далее по воздуховоду отчищенный воздух поступает в блок фотоприёмника. В блоке содержания фотоприёмника воздушные потоки обтекают фотоэлемент и через апертуру блока выходят наружу экспериментальной установки.

Использование данной системы защиты фотоприёмника и излучателя позволило резко снизить требования к объему прокачиваемого воздуха для защиты оптических элементов – апертуры излучателя и фотоприёмника. Снижение расхода чистого воздуха, полученное при изготовлении экспериментальной установки, позволило провести расчёты требуемого фильтра, обеспечивающего отчистку поступающего воздуха на протяжении длительного срока при различных уровнях запылённости.

С другой стороны, было установлено, что низкая скорость воздуха, выходящего из апертуры, не влияла на концентрации пыли в измерительном объеме. Компрессор, подающий чистый воздух для обдува фотоэлемента, подключен в электрическую схема таким образом, что работает непрерывно при подаче электрического питания.

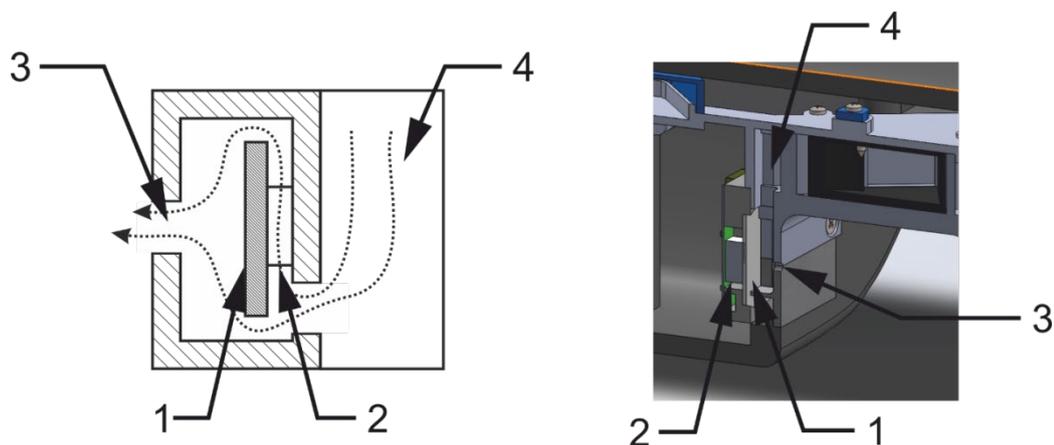


Рисунок 5.8 – Схема защиты фотоприемника с использованием потока чистого воздуха: 1 – интерференционный светофильтр; 2 – фотоприемник, 3 – апертура, 4 – воздуховод от компрессора и фильтра

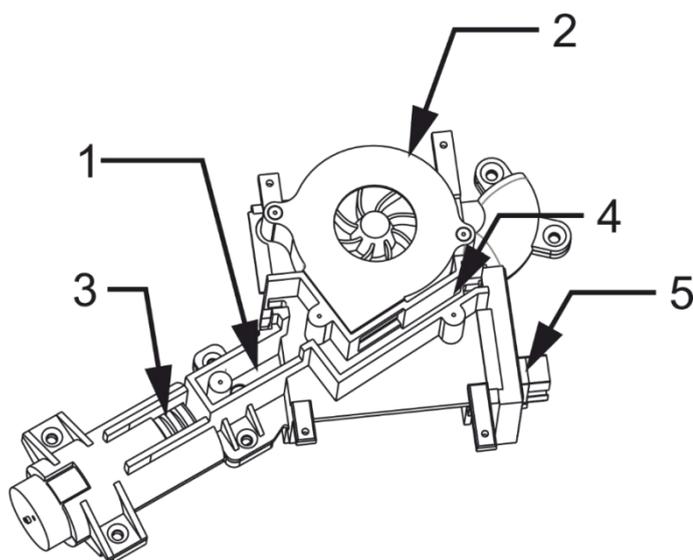


Рисунок 5.9 – Защита оптических элементов в экспериментальной установке: 1, 4 – воздуховоды чистого воздуха, 2 – компрессор, 3 – оптический излучатель, 5 – фотоприёмник

Также было установлено, что витающая угольная пыль в процессе движения, приобретающая электростатических заряд, может накапливаться на поверхности фильтра защищаемого фотоприёмника от паразитного излучения. Было отмечено появление тонкодисперсного налета на светофильтре напротив апертуры фотоприёмника. Было установлено, что данный пылевой налет возникает во время эксплуатации экспериментальной

установки при отключенном компрессоре обдува фотоприёмника, данная ситуация возникала при снятии напряжения с установки по различным причинам.

Для решения запыления поверхности на время отключения компрессора, связанного с накоплением статического электричества, было разработано специальное покрытие, а также технология его нанесения. Данное покрытие снижало сопротивление установленного интерференционного светофильтра до приемлемого значения в 500–600 кОм, что полностью сняло проблему накопления статического электричества на поверхности светофильтра. Использование при создании современных материалов, в том числе и с односторонними нанотрубками, позволило создать покрытие с коэффициентом пропускания свыше 95 %.

Использование светофильтров с токопроводящим покрытием, а также специальной схемы устранило проблему накопления статического заряда и накопления тонкодисперсной фракции пыли на внутренних поверхностях экспериментальной установки.

Для защиты от паразитного оптического излучения были применены следующие подходы:

1. Создание конструкции экспериментальной установки, в которой расположение излучающих и принимающих элементов подобрано таким образом, чтобы максимально снизить попадание света из окружающего пространства прибора.
2. Применены оптические ловушки для сбора оптического излучения от излучателя, не позволяющие производить подсветку измерительного объема отраженным светом.
3. На поверхности ловушек, а также элементов, способных преобразовать оптический поток излучателя, нанесены светопоглощающие покрытия.

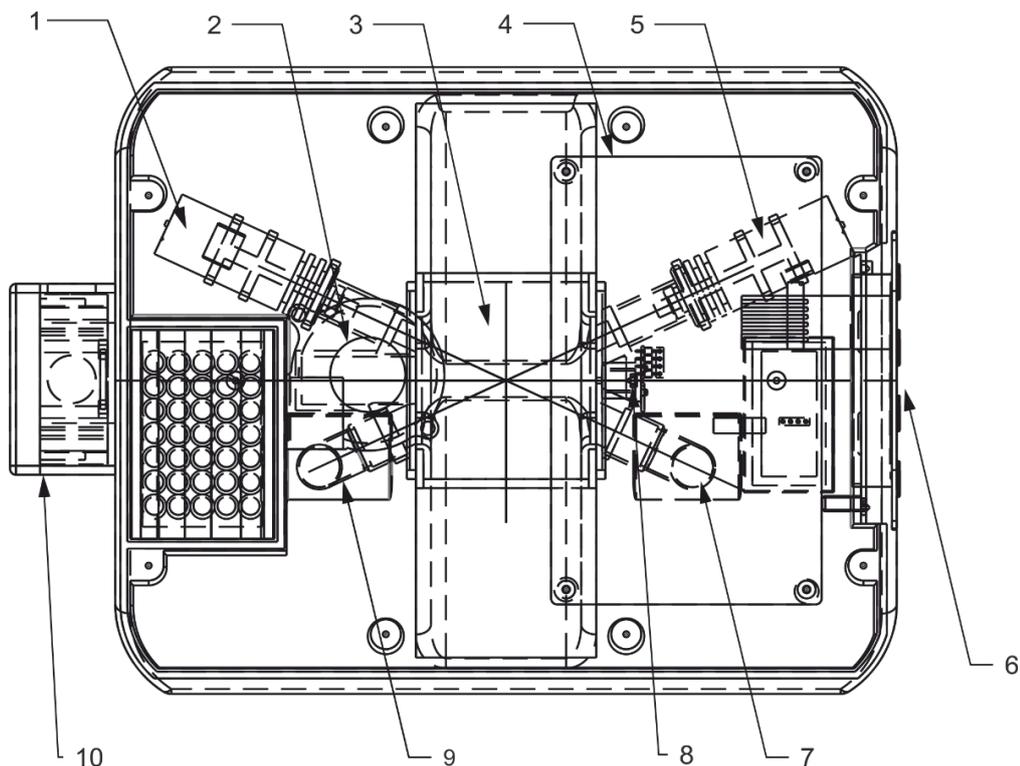


Рисунок 5.10 – Чертеж экспериментальной установки автоматического оптического измерителя запыленности

Достаточно успешная эксплуатация приборов ИЗСТ-01 в течение нескольких лет, а также появление аналогов сделали возможным внесение изменений в нормативную документацию, связанных с автоматическим непрерывным измерением массовой концентрации пыли.

Также была разработана и аттестована методика по использованию приборов ИЗСТ-01 для контроля пылеотложения, проведены испытания методики на угольных шахтах.

Разработана методика измерения и создан взрывозащищенный прибор (патенты RU186970U1, RU80503U1, RU72547U1, RU61883U1) с возможностью подключения в систему аэрогазового контроля шахты для непрерывного измерения массовой концентрации угольной пыли, и организовано его внедрение, позволяющее повысить оперативную осведомленность о состоянии технических средств пылеподавления,

принимать оперативные решения по охране здоровья работников угольных шахт, что непосредственно влияет на состояние охраны труда.

Выводы по главе

1. 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.

2. 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.

ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА И ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ, УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ ФАКТОРОМ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ, ОПАСНЫХ ПО ВЗРЫВАМ МЕТАНА И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Приведенный в первой главе комплексный анализ инцидентов, аварий и несчастных случаев на производстве показывает, что до 95 % этих нежелательных событий обусловлены человеческим фактором, в том числе недостаточной компетентностью – низкой способностью работников выполнять работу в соответствии с требованиями охраны труда.

6.1. Построение концептуальной многоуровневой модели компетентности (комплекса способностей) работников в сфере охраны труда

Построение концептуальной многоуровневой модели компетентности работников в сфере охраны труда можно рассматривать как предварительный этап разработки собственно модели человеческого фактора.

Как правило, для повышения компетентности работников до требуемого уровня используется обучение работников безопасным методам и приемам выполнения работ.

Обучение охране труда – один из самых эффективных способов управления безопасностью, однако следует отметить, что существующие ограничения по объемам усвоения необходимых знаний, по длительности хранения этих знаний в памяти человека и т. п. устанавливают для каждого работника некий предельный уровень компетентности, который он может получить через обучение. Кроме того, вероятность ошибочных и некомпетентных действий, приводящих к несчастным случаям, повышает

ограниченность интеллектуальных, сенсорных, защитных и физических возможностей человека.

Формирование комплексных подходов к управлению человеческим фактором, на наш взгляд, лучше отрабатывать на моделях, которые учитывают вышеупомянутые возможности и были изложены в работах автора [259, 260].

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

На базе этого определения получаем следующие «расширенные» определения, на которые мы будем опираться в рамках данной работы.

Известно, что для выполнения работы, кроме способностей применять на практике знания и навыки (интеллектуальная способность), требуется набор таких способностей, как сенсорные, защитные и физические.

Опираясь на это, можно сформулировать следующее расширенное определение компетентности [260], в котором подчеркнуты требования безопасности труда:

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

Как правило, для этого требуется развитое целеполагание, разумное планирование использования ресурсов, грамотное построение путей достижения цели, основанное на использовании рабочей памяти, систематического анализа поступающей информации и умение находить в ней связи и т. п. В целом уровень интеллектуальных способностей определяется уровнем психологического развития индивидуума [261].

Очень важную роль в способности практического использования знаний, навыков и т. д. играет дисциплина труда – «обязательное для всех работников подчинение правилам поведения, определенным в соответствии с ТК РФ, иными ФЗ, коллективным договором, соглашениями, локальными нормативными актами, трудовым договором» (ст. 189 ТК РФ) [106].

Считается, что ограничения, накладываемые физиологическими способностями человека обрабатывать и усваивать поступающую информацию, являются теми барьерами, которые формируют пределы интеллектуальных способностей индивидуума. Пример широко распространённого ограничения – важная, но редко используемая информация, забывается.

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

Каждый орган чувств имеет свой диапазон измерения опасностей и, как правило, сигнализирует об уровне опасности при помощи нарастания неприятного ощущения вплоть до возникновения боли. Например, ощущение температуры: «очень холодно» – «холодно» – «прохладно» – «нормально» – «тепло» – «жарко» – «очень жарко». В то же время, хотя ощущения «очень холодно» и «очень жарко» сообщают об экстремальной температуре окружающей среды, во многих случаях для принятия правильного решения

точности этих данных недостаточно, откуда вытекает ограниченность сенсорных способностей человека. Более того, естественные физиологические ограничения нашего организма не позволяют сколько-нибудь точно измерять физические величины, связанные как с охраной труда, так и с технологическими процессами.

Дополнительные ошибки в точное восприятие окружающей действительности вносит и негативная адаптация – отклонение избыточной (по «мнению» интеллекта) сенсорной информации, которая может приводить к пропуску критически важной информации. Одним из видов негативной адаптации служит снижение чувствительности – негативная адаптация рецептора.

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

Некоторые возможности расширения защитных свойств обеспечивают механизмы адаптации – процессы приспособления строения и функций органов организма к постоянно изменяющимся условиям существования во внешней среде. Рассматривая комплекс защитных способностей организма, в том числе таких, как заживления мелких ран, устойчивость к изменению температуры окружающей среды, улавливанию частиц пыли в носовых проходах, следует отметить, что он достаточно сильно ограничен в разрезе существующих опасностей современного производства.

В основном ограничения защитных способностей организма связаны с невозможностью провести быструю адаптацию защитных функций организма к современному производству и компенсировать широкий диапазон воздействия неблагоприятного фактора на человека.

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

По существующим на сегодня представлениям о физических возможностях организма и максимальных воспринимаемых нагрузках, пиковая физическая нагрузка может достигать десятикратного уровня по отношению к повседневному уровню. Здесь следует подчеркнуть, что работа при такой высокой нагрузке фактически невозможна, возможен только краткосрочный выброс накопленной энергии.

Не рассматривая экстремальные ситуации, в нормальных условиях, человек полностью ограничен своими повседневными нагрузками и, следовательно, соответствующим ему уровнем развития физических способностей, которые определяют его физическую компетентность.

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

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

Данные положения можно проиллюстрировать при помощи закона толерантности Шелфорда [263], 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».

Для разделения степени воздействия окружающей среды обратимся к классам условий труда, каждому из которых 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» и четко регламентирована [264].

Иллюстрацией закона толерантности Шелфорда с учетом классов условий труда служит график, приведенный на рисунке 6.1.

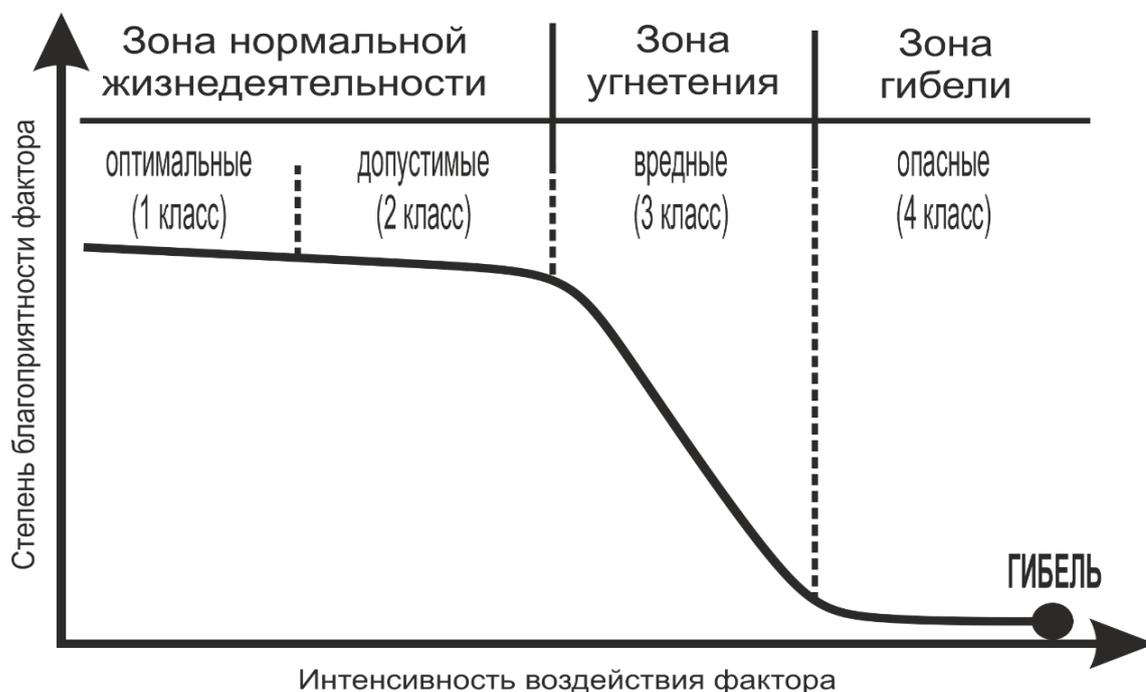


Рисунок 6.1 – Закон толерантности Шелфорда и классы условий труда

Как видно из рисунка 6.1, 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. В то же время использование эффективных средств индивидуальной защиты позволяет вести работы даже при таких условиях. Работа в опасных условиях труда, соответствующих 4 классу, может привести к гибели даже в течение одной рабочей смены.

Развивая предлагаемую модель, далее предлагается использовать следующие три основных уровня для каждой составляющей 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).

Приведем более подробные описания каждого уровня комплекса способностей.

I. Исходный уровень комплекса способностей (ИКС) – это уровень естественных, исходных (природных) способностей человека до начала выполнения своих обязанностей в соответствии с заключенным трудовым договором.

II. Допустимый уровень комплекса способностей (ДКС) — уровень компетентности, при котором нагрузки опасных (вредных) факторов рабочей среды и трудового процесса на основные составляющие компетентности (интеллектуальную, сенсорную, защитную и физическую способности) соответствуют оптимальным (1 класс) и допустимым (2 класс) условиям труда.

На рисунке 6.2 приведена графическая иллюстрация закона толерантности Шелфорда с учетом классов условий труда для рабочих помещений с нагревающим и охлаждающим микроклиматом.

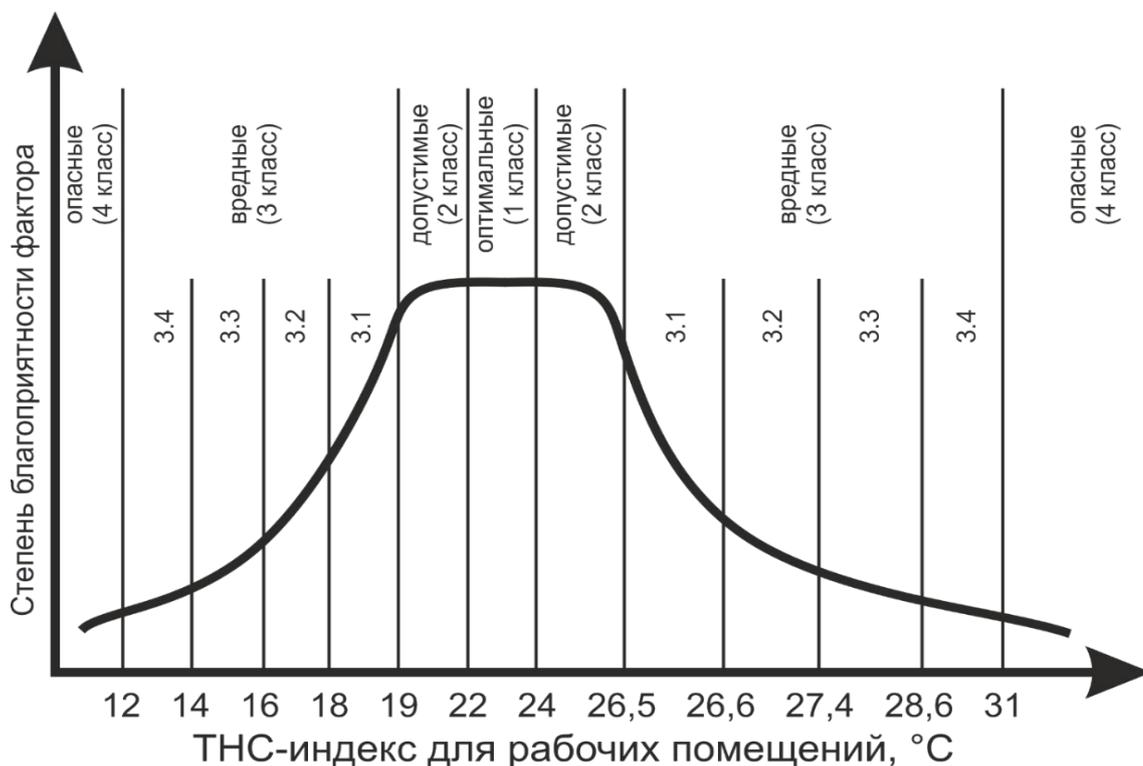


Рисунок 6.2 – Графическая иллюстрация закона толерантности Шелфорда с учетом классов условий по фактору «температура»

III. Недостижимый уровень комплекса способностей (НКС) – это уровень компетентности, при котором естественные возможности человека уже не позволяют выполнять заданную работу или условия труда соответствуют четвертому классу.

При этом уровне в полную силу вступают ограничения физиологических возможностей организма: невозможно без специальных средств выполнять работу – невозможно поднять тяжесть, запомнить информацию или почувствовать опасные изменения внешней среды. Только применение социализированных и эффективных средств расширения физиологических возможностей способно увеличить допустимый уровень компетентности в зону этого уровня.

Требуемый (рабочий) уровень комплекса способностей (ТКС) – совокупность требований к интеллектуальным, сенсорным, защитным и

физическим способностям человека, которые необходимы для безопасного выполнения заданной работы.

В общем случае данный набор требований к способностям состоит из: перечня производственных опасностей; перечня индивидуальных и коллективных защитных средств; перечня безопасных методов и приемов выполнения работ и т. п.

Добавленные уровни комплекса способностей (ДК₁ и ДК₂).

Первый добавленный уровень способностей (ДК₁) – 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 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.).

Рассмотрим возможности предлагаемой модели с использованием широко известного алгоритма, разработанного для анализа профессиональных рисков. В качестве примера выберем работника угольной шахты.

1. Идентификация опасностей.

Вредной фактор – витающая угольная пыль.

Возможный вред здоровью – заболевания: пневмокониозы, пылевые бронхиты, экземы, дерматиты, конъюнктивиты, аллергия и др.

Предельно допустимые концентрации угольной пыли с содержанием менее 2 % двуокиси кремния – 10 мг/м³.

2. Оценка рисков вреда здоровью – оценка вероятности нежелательного воздействия.

Условия труда по специальной оценке по пыли на разных рабочих местах обычно соответствуют классам 3.2 и 3.3.

3. Управление профессиональными рисками.

Выполнение соответствующих технических мер защиты от витающей угольной пыли, таких как пылеподавление.

Достижение требуемого (рабочего) уровня комплекса способностей (ТКС) обеспечивается путем расширения исходного уровня комплекса способностей, за счет добавленных уровней комплекса способностей ДКС₁ и ДКС₂.

Данный подход продемонстрирован в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Применение предлагаемой модели на примере работника угольной шахты

Интеллектуальные способности	Сенсорные способности	Защитные способности	Физические способности
ИКС. Исходный уровень способности недостаточен	ИКС. Естественные сенсорные способности не обеспечивают требуемый уровень контроля запыленности	ИКС. Естественные защитные способности не обеспечивают допустимый уровень безопасности	ИКС. Естественные физические способности не полностью обеспечивают допустимый уровень способности
ДКС₁. Обретение знаний, навыков, опыта, необходимых для безопасного выполнения работ в условиях повышенной запыленности шахтной атмосферы	ДКС₁. Увеличение способностей за счет естественного развития сенсорных способностей не обеспечивает требуемый уровень контроля запыленности	ДКС₁. Увеличение способностей за счет естественного развития защитных способностей не обеспечивает требуемый уровень безопасности	ДКС₁. Увеличение способностей за счет навыков работы с использованием СИЗ
ДКС₂. Увеличение способностей осуществляется за счет специальных электронных средств, содержащих информационные системы, инструкций по ОТ, технологических регламентов и т. п.	ДКС₂. Увеличение способностей осуществляется за счет: 1. Стационарных датчиков контроля уровня запыленности 2. Индивидуальных технических средств контроля запыленности шахтной атмосферы	ДКС₂. Увеличение способностей осуществляется за счет: 1. Средств индивидуальной защиты органов дыхания – пневмокониоз, пылевой бронхит 2. Других СИЗ в соответствии с возможным вредом здоровью 3. Лечебно-профилактические и реабилитационные мероприятия	ДКС₂. Увеличение способностей не требуется

Из таблицы 6.1 следует, что предлагаемая модель позволяет комплексно, с учетом требований работы и условий труда, добиться расширения комплекса способностей работников до требуемого уровня. В частности, предлагаемая

модель оказалась удобным инструментом при подготовке программ обучения охране труда.

На рисунке 6.3 представлена графическая иллюстрация данных, приведенных в таблице 6.1.

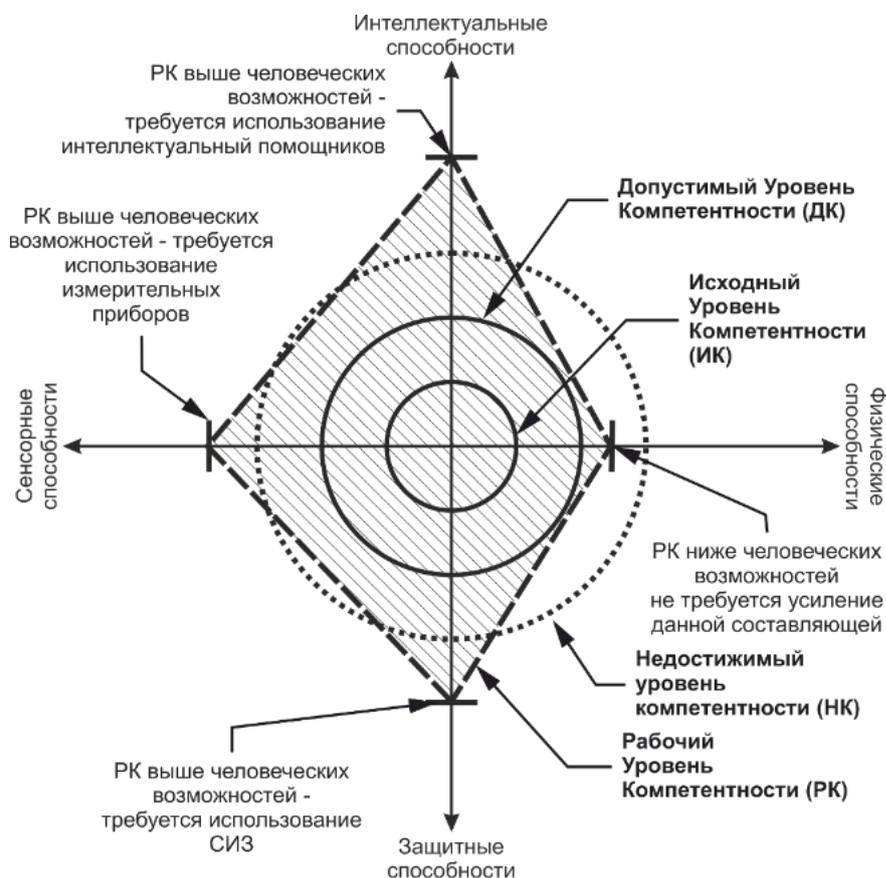


Рисунок 6.3 – Графическая иллюстрация данных таблицы 6.1

Предлагаемая «Многоуровневая модель компетентности (комплекса способностей) работников в сфере охраны труда» позволяет комплексно, с учетом требований работы и условий труда, используя различные приемы управления способностями человека, добиться расширения комплекса способностей работников до требуемого уровня.

В частности, предлагаемая модель оказалась удобным инструментом при подготовке программ обучения охране труда.

6.2. Построение концептуальной модели человеческого фактора

Следует отметить, изложенный выше подход открывает новые возможности для описания так называемого «человеческого фактора».

Действительно, обзор понятий человеческого фактора свидетельствует о том, что определения человеческого фактора и расширенное определение компетентности, также опирающееся на различные способности работника, в целом коррелируют друг с другом.

Опираясь на многоуровневую модель компетентности (комплекса способностей) работников в сфере охраны труда, человеческий фактор, в первом приближении, можно выразить с помощью простого выражения [260]:

$$\text{ЧФ} = \text{ФКС} - \text{ТКС}, \quad (6.1)$$

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

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

Исходя из соотношения (6.1), человеческому фактору можно дать следующее определение.

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

Данная формулировка довольно проста. Например, если ФКС меньше ТКС, то ЧФ – отрицательная величина и возможны неправильные, опасные действия работника и, как следствие, инциденты, аварии и травмы.

Если ФКС больше ТКС, то ЧФ – положительная величина, и следует ожидать качественное и безопасное выполнение работы.

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 – малы знания, навыки и опыт, необходимые для безопасного выполнения работы. По мере нарастания стажа у работника появляются эти способности необходимого качества и, как следствие, травматизм у них 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.

В приведенном выше определении человеческого фактора упор делается на способности человека. Это не обязательно. Можно составить иной набор характеристики человека и конечной цели. Однако ЧФ всегда будет определяться некоторой разностью между возможностями человека и поставленной целью.

Формулу 6.1 можно представить в несколько другом виде. Разделим ЧФ и ФКС на ТКС. В результате чего получим долю влияния человеческого фактора:

$$\Delta\text{ЧФ} = \Delta\text{ФКС} - 1, \quad (6.2)$$

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 как на рисунке 6.4 геометрической фигурой в виде ромба.

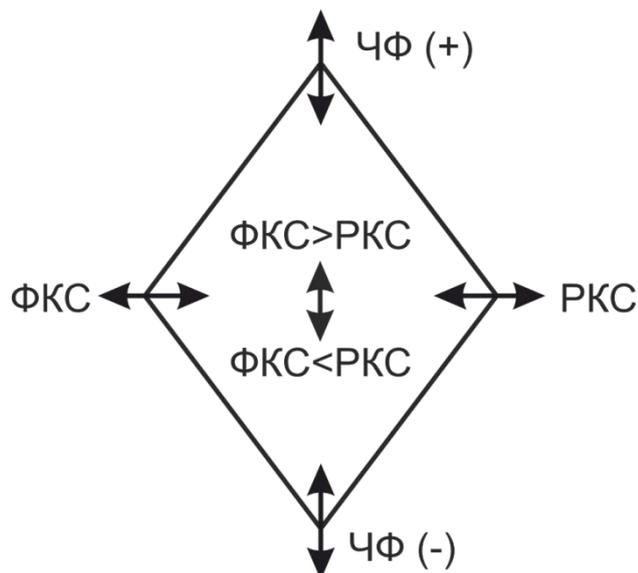


Рисунок 6.4 – Геометрическое представление человеческого фактора фигурой в виде ромба

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.

Или как на рисунке 6.5 в виде двух треугольников.

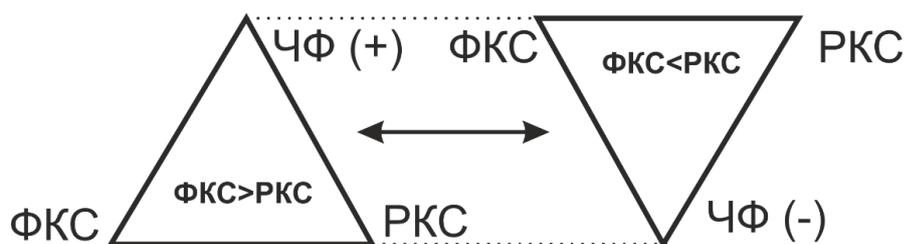


Рисунок 6.5 – Геометрическое представление человеческого фактора в виде двух треугольников

В соответствии с поставленной задачей по разработке модели, модель должна позволить оценить человеческий фактор и предложить подходы к управлению этим фактором.

Напомним, что понятие ЧФ включает в себя комплекс способностей, который, в свою очередь, содержит интеллектуальные, сенсорные, защитные, физические способности.

Выше уже отмечено, что в управлении человеческим фактором можно выделить три основных направления:

1. Управление за счет обучения в сфере безопасности труда.
2. Управление за счет создания безопасных и безвредных условий труда, в том числе с использованием средств индивидуальной защиты.
3. Управление за счет разработки и внедрения машин, технологических процессов и т. п., соответствующих человеческому фактору.

Данный перечень, разумеется, можно расширить, но в нашем случае будем считать его достаточным.

Последовательно рассмотрим все три основных направления в управлении человеческим фактором.

1. Управление человеческим фактором за счет обучения в сфере охраны труда.

Развитие интеллектуальной составляющей происходит за счет обретения знаний, навыков и опыта в части безопасных методов и приемов безопасного выполнения работ. Например, с учетом, выполненных диссертантом исследований по изучению разрушения углей и процессов пылеобразования.

Приобретение знаний, когда и как необходимо использовать технические средства, обеспечивающие способность быстрого и обоснованного принятия решений по вопросам ОТ (персональные компьютеры, электронные планшеты, смартфоны и т. п.). Например, с помощью разработанного диссертантом взрывобезопасного многофункционального электронного устройства «Умный напарник», о котором будет сказано далее.

В процессе обучения происходит «настройка» сенсорной системы – органов зрения, слуха, обоняния, осязания на правильную фиксацию признаков опасностей.

Объясняется, когда и как необходимо использовать технические средства контроля окружающей среды (приборы контроля условий труда и т. п.).

Развиваются первичные защитные способности за счет обретения знаний при каких условиях труда и против каких опасных и вредных производственных факторов какие средства индивидуальной необходимо использовать.

В процессе обучения происходит развитие первичных физических способности – развиваются за счет освоения оптимальных и безопасных трудовых движений, действий, приёмов, которые пригодятся в процессе работы.

Также происходит обучение правильному использованию различных специальных технических средств (инструменты, приспособления и т. п.), которые дополняют исходные физические способности.

Проведенное сопоставление показывает, что обучение в той или иной степени развивает весь комплекс способностей формируются добавленные уровни способностей ($ДК_1$).

По результатам обучения можно дать персональную оценку человеческого фактора ученика.

Используя формулу 6.2 напрямую:

$$\Delta ЧФ = \Delta ФКС - 1, \quad (6.3)$$

где, в данном случае, $\Delta ФКС$ – это отношение числа правильных ответов к общему числу вопросов при проверке знаний.

При этом значение $\Delta ЧФ$ может быть отрицательной величиной или равен нулю.

Кроме того, по формуле 6,2 можно оценить и эффективность самого обучения.

Для проведения этой оценки немного изменим формулу 6.2.

$$\Delta\text{ЧФ} = \Delta\text{ФКС} - 1, \quad (6.4)$$

где $\Delta\text{ФКС}$ теперь – это отношение числа правильных ответов после обучения к числу правильных ответов при предварительной (до обучения) проверке знаний.

Таким образом, можно считать доказанным, что управление человеческим фактором возможно с помощью действующей системы управления обучением по охране труда.

2. Управление за счет создания безопасных и безвредных условий труда, в том числе с использованием средств индивидуальной защиты.

Как известно [106], «безопасные условия труда – условия труда, при которых воздействие на работающих вредных и (или) опасных производственных факторов исключено либо уровни их воздействия не превышают установленных нормативов».

При классах условий труда 1 и 2 никаких мер по управлению человеческим фактором не требуется.

При классах условий труда 3.1–3.4 необходимо расширение способностей выше допустимого уровня за счет искусственных средств увеличения интеллектуальной, сенсорной, защитной и физической составляющих компетентности (ДКС_2).

Как уже упоминалось выше, управление интеллектуальными способностями осуществляется за счет оснащения работника необходимыми техническими средствами, обеспечивающими возможность быстрого и обоснованного решения по вопросам ОТ (персональные компьютеры, электронные планшеты, смартфоны и т. п.).

Управление сенсорными способностями происходит при помощи оснащения работника техническими средствами контроля окружающей среды (приборы контроля условий труда и т. п.). Например, разработанный диссертантом комплекс технических устройств, который обеспечивает контроль пылевой обстановки.

Управление защитными способностями человеческого фактора, как правило, осуществляется за счет оснащения работников соответствующими средствами индивидуальной защиты, которые обеспечивают защиту органов зрения, дыхательных путей, органов слуха, головы, рук, ног, кожных покровов от опасных и вредных производственных факторов [265]. Кроме того, управление осуществляется при помощи средств коллективной защиты.

Управление физическими способностями происходит при помощи обеспечения работника специальными техническими средствами (инструментами, приспособлениями и т. п.), которые позволяют выполнять работу без физического перенапряжения.

Приведенные выше рассуждения показывают, что действующая система управления условиями труда, в том числе с использованием средств индивидуальной защиты, однозначно управляет и человеческим фактором.

Предлагаемая диссертантом концептуальная модель человеческого фактора в целом соответствует требованиям, которые обычно предъявляют к данным моделям: сформирован набор необходимых понятий и дано новое определение человеческого фактора; установлены взаимосвязи между различными элементами модели; предложены общие формулы, позволяющие разрабатывать различные методы оценки человеческого фактора; показана связь модели с действующими системами управления охраной труда.

Человеческий фактор в приведенной выше формулировке может послужить основой создания еще одного хорошего критерия для оценки человеческого капитала, который тесно связан с такими человеческими характеристиками, как интеллектуальные способности (знания, навыки,

опыт), здоровье (соответствие человеческих способностей условиям труда) и т. п.

6.3. Разработка концептуальной модели персональной системы управления человеческим фактором

Изложенная выше «Концептуальная модель человеческого фактора», которая органично вписывается в систему управления охраной труда, 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 в себя 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.

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 Системы, рисунок 6.6.

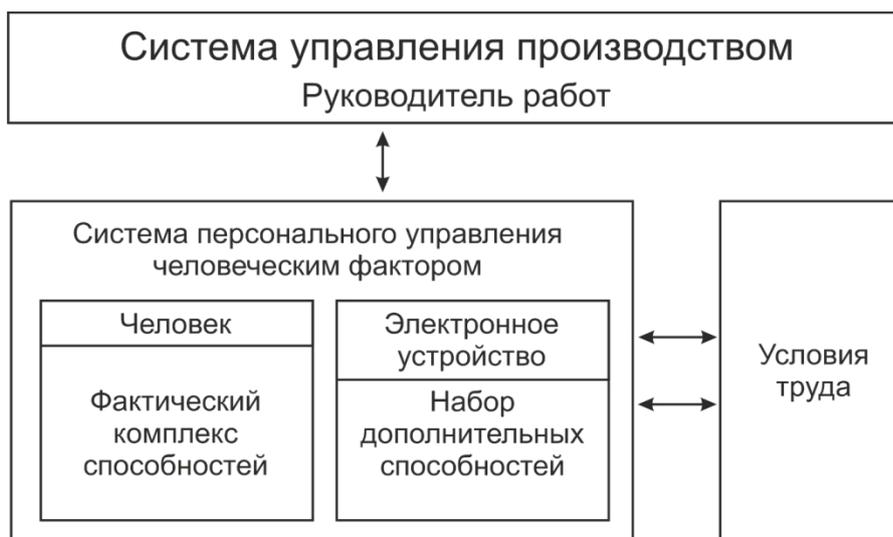


Рисунок 6.6 – Принципиальная схема управления человеческим фактором в рамках производства

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 технических устройств (планшетов и т. п.). Техническое устройство 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.

В системе важная роль в управлении человеческим фактором отводится электронному устройству, являющемуся носителем дополнительных интеллектуальных и сенсорных способностей работника.

С целью выбора технического устройства для увеличения способностей был проведен обзор электронных планшетов (требования эргономики), выполненных во взрывобезопасном исполнении (требования условий труда).

Анализ рынка приборов для реализации данного функционала показал, что в России и за рубежом представлено очень ограниченное количество электронных планшетов с возможностью эксплуатации во взрывоопасных условиях. Основными представителями на рынке являются планшеты Toughpad (Panasonic, Japan), Getac (Bartec, USA), но данные устройства не способны реализовать в полном объеме те требования, которые предъявляет персональное управление человеческими фактором к электронному носителю.

Следовательно, требуется разработать устройство, способное реализовать поставленные требования.

Создание многофункционального носимого электронного устройства для взрывоопасного производства может проходить следующим образом:

- добавление элементов, обеспечивающих необходимый уровень взрывозащиты к серийно выпускаемому устройству;
- создание устройства полностью ориентированного на требования персонала шахт, предусматривает полный цикл разработки и производства устройства.

Приборы, созданные по первому варианту, – SBGPS Mphone (Гранч, Россия), ИПК («Девис дерби Сибирь», Россия) – являются модифицированными изделиями, первоначально не рассчитанными на использование во взрывоопасной обстановке, в связи с этим существуют серьезные конструктивные ограничения для модификации данных устройств под требования персонала угольных шахт.

Устройства, напрямую разрабатываемые под требования взрывозащиты, лишены этого недостатка, более того, имея полный комплект конструкторской документации и необходимых компетенций, возможно внесение необходимых изменений в разрабатываемое устройство для адаптирования его к постоянно меняющимся требованиям производства.

В то же время внедрение различных приборов, осуществляющих комплексный контроль состояния пылевой обстановки на угольных шахтах, позволило повысить оперативность решений, связанных с применением мер по контролю противопылевых мероприятий в угольных шахтах. Следующим шагом является оперативный учет не только данных, передаваемых в систему АГК автоматическими средствами измерений, но и передачи данных в систему автоматизированного управления шахтой от портативных и автономных приборов, например, ПКП, ПКА-01, СКПДС, Гасос, а также получения оперативной информации о состоянии пылевзрывобезопасности выработок из системы АГК или другой системы автоматизированного управления шахтой.

Таким промежуточным звеном между портативными, автономными приборами и системой обмена информацией в шахте может послужить электронное многофункциональное взрывозащищённое устройство (электронный планшет, МФУ). Данное устройство с установленным на нем комплексом программ позволит вести учет отобранных проб, проведённых измерений и обмениваться информацией с центральным сервером автоматизированного управления шахтой.

Следует подчеркнуть, что МФУ с использованием дополнительных модулей может решать широкий спектр задач, напрямую не связанных с пылевым контролем.

Исходя из вышеизложенного, было принято решение провести полную разработку электронного многофункционального устройства и была создана блок-схема для разрабатываемого устройства.

Блок-схема представлена на рисунке 6.7, где показаны основные элементы разработанного МФУ. Для решения вопросов взрывозащиты при использовании мощного процессора с высоким тепловыделением были применены специальные научно-обоснованные конструктивные элементы взрывозащиты для ограничения тока с возможностью высокоскоростной передачи данных по проводным интерфейсам, разработан материал для

изготовления корпуса прибора, обеспечивающий решение проблемы накопления статического электричества.

Взрывозащита внешних цепей планшета проектировалась с учетом анализа существующей в настоящее время элементной базы датчиков различных химических и физических величин, в том числе и для целей анализа вредных факторов при специальной оценке условий труда.

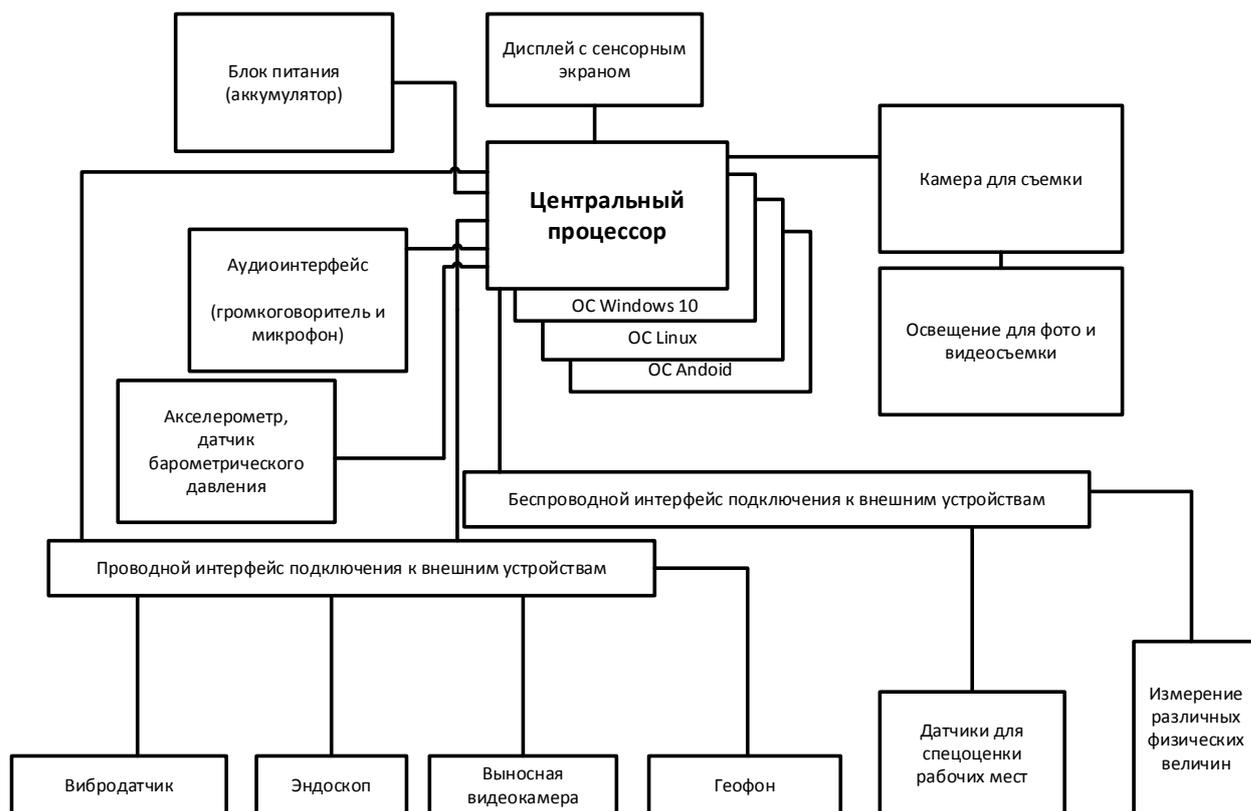


Рисунок 6.7 – Блок-схема МФУ «Умный напарник»

Приведем краткое описание технических возможностей разработанного устройства. Корпус прибора выполнен из пластмассы с антистатическими добавками и обеспечивает защиту от пыли и влаги. Сенсорный дисплей размером 170 мм (7“) по диагонали снабжен защитным стеклом и оборудован сенсорной панелью. Установленное разрешение на дисплее позволяет комфортно читать текст и пользоваться схемами и картами. На задней панели установлена телевизионная камера для съемки тепловой картины объекта. Также на задней панели установлена фотокамера, снабженная мощным осветителем для проведения съемки в условиях низкой освещенности.

Устройство снабжено беспроводными интерфейсами, позволяющими подключаться к сетям Wi-Fi и сотовой связи для оперативной передачи информации. Установленный на задней панели прибора разъем со скоростными интерфейсами для обмена данными позволяет расширять возможности устройства за счет подключения дополнительных модулей. Данный разъем обеспечивает искробезопасное питание дополнительных внешних устройств. Установленная модульная плата с процессором и оперативной памятью позволяет изменять конфигурацию устройства в соответствии с требованиями заказчика, что позволяет устанавливать не только процессор Intel в базовой конфигурации, но и процессоры других производителей, например, Baikal-T1 российской компании «Байкал электроникс».

Анализ современной элементной базы различных датчиков физических величин показал, что возможно создание дополнительных устройств для МФУ с токами потребления, ограниченными условиями взрывозащиты, что позволит создать линейку дополнительных устройств для МФУ. Среди дополнительных устройств следует отметить: систему для измерения вибрации машин и механизмов, эндоскоп для осмотра вертикальных и горизонтальный скважин, устройство для измерения шумов с использованием геофона, устройство для измерения расстояния и сечения выработок. Ведутся НИОКТР по разработке комплекта датчиков для измерения вредных и опасных производственных факторов в целях специальной оценки условий труда.

Двунаправленная передача данных между автоматизированной системой управления шахтой и многофункциональным устройством позволит убрать задержки, а также сократить до минимума человеческий фактор при измерении приборами ПКП и ПКА-01, связанный с подъемами на поверхность для ввода данных в систему, а также получать информацию о состоянии пылевзрывобезопасности на смежных участках, получать информацию о

состоянии пылевой обстановки от автоматических датчиков контроля пылевой обстановки.

Несмотря на то, что система АГК должна охватывать большинство выработок шахты, использование существующих проводных систем в некоторых местах является экономически неоправданным, например, места, в которых не требуется непрерывная передача данных в систему АГК в связи с тем, что измеряемые процессы протекают достаточно медленно. Но это не отменяет необходимости автоматического мониторинга для выявления тенденции к возникновению опасной ситуации. В таких случаях могут быть использованы приборы с встроенной памятью для накопления информации об измеренных параметрах, а передача данных осуществляется периодически с использованием многофункционального устройства.

Например, модификация прибора ИЗСТ-01 может собирать данные о массовой концентрации пыли в атмосфере и сохранять в постоянное запоминающее устройство в течение продолжительного времени, используя автономный источник питания. Периодическая передача данных инициируется многофункциональным устройством и осуществляется по беспроводному интерфейсу на МФУ, находящееся в радиусе 3–5 метров от измерителя запыленности. В данном случае проводные линии для подключения прибора в информационную систему не требуются, требуется только обеспечить автономное электропитание измерителя.

Использование других приборов, переносных и автономных, таких как ПКП и ПКА-01, также может быть автоматизировано с целью повышения оперативности передачи данных. Данные о проведенных измерениях с ручных, портативных приборов могут быть введены в МФУ вручную либо переданы через беспроводной интерфейс. В МФУ данные могут быть просмотрены сотрудником, к ним добавлены замечания, дополнительная информация.

Данная модель может модифицироваться в зависимости от конкретной специфики производства и формы системы управления охраной труда на предприятии.

Отметим, что МФУ «Умный напарник» полностью удовлетворяет тем требованиям, которые персональная система управления человеческим фактором предъявляет к электронным напарникам.

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

«Умный напарник» позволяет хранить в памяти устройства одновременно: 100 000 страниц текстовой и графической информации; свыше 100 часов видеофильмов; содержать современное программное обеспечение для проведения сложных расчетов непосредственно в шахте; программное обеспечение.

Обеспечение дополнительных интеллектуальных способностей работника осуществляется и при помощи системы фото- и видеофиксации 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 IС T4 X.

С мая 2019 года данное устройство находится в серийном производстве и осуществляются поставки на предприятия России.

На рисунке 6.8 приведен пример применения схемы персональной системы управления человеческим фактором на примере пылевого фактора с использованием электронного планшета «Умный напарник».

Управление Человеческим фактором

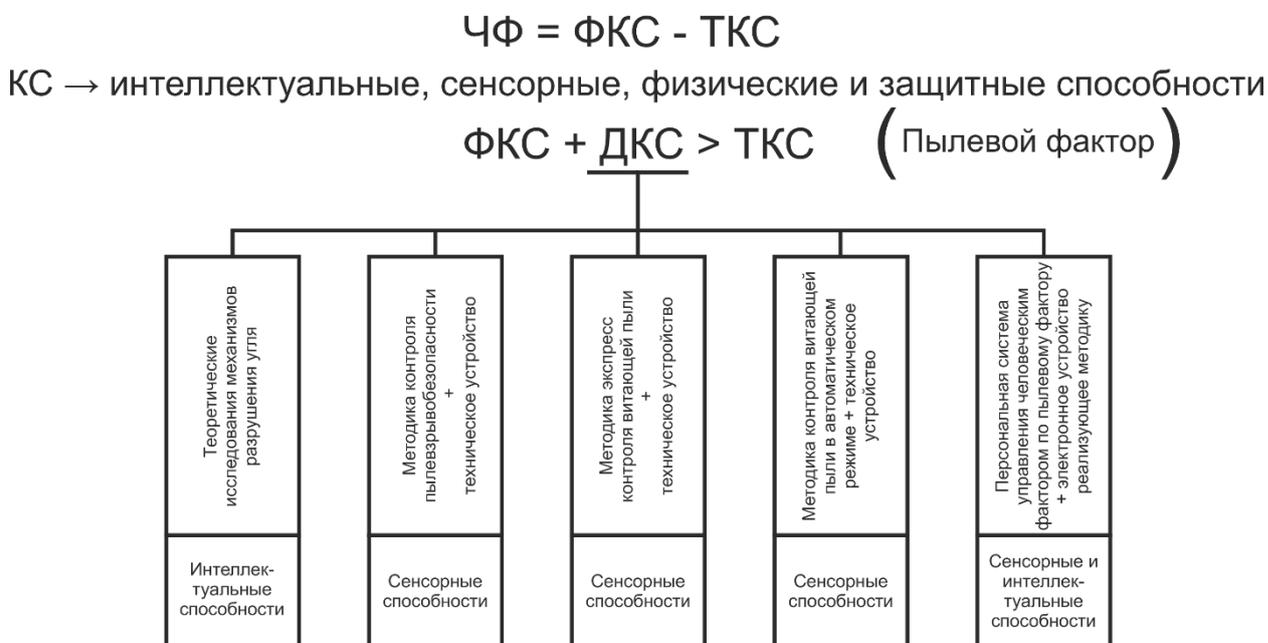


Рисунок 6.8 – Принципиальная схема персональной системы управления человеческим фактором (пылевой фактор)

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.

– электронный носитель персональной системы управления человеческим фактором обеспечивают 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.

Выводы по главе

1. Опираясь 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.

2. 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 и создано электронное взрывобезопасное устройство (планшет «Умный напарник»), являющееся носителем дополнительных интеллектуальных и сенсорных способностей работника и которое можно использовать на угольных шахтах, опасных по взрывам метана и угольной пыли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалифицированной работой, в которой решена крупная научно-техническую проблема, имеющая важное хозяйственное значение, связанную 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 ($DR \sim 2,5$) 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, характеризующая 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь – декабрь 2018 года / И.Г. Таразанов // Уголь. – 2019. – № 3. – С. 64–79.
2. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2018 году / ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – Москва, 2019. – 410 с.
3. Годовой отчет о деятельности Сибирского управления Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2018 году. – Кемерово, 2019. – 213 с.
4. Отчет Кемеровской межрайонной прокуратуры по надзору за исполнением законов в угледобывающей отрасли за 2018 год [Электронный ресурс] // URL:<http://www.kemprok.ru/> (дата обращения 08.06.2020).
5. Отчет Государственной инспекции труда в Кемеровской области за 2018 год [Электронный ресурс] // URL: https://git42.rostrud.ru/protivodeystvie_korruptsii/doklady_otchety_obzory_statisticheskaya_informatsiya/ (дата обращения 08.06.2020).
6. Годовой отчет о результатах деятельности Сибирского управления Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору за 2018 год. – Кемерово, 2019. – 213 с.
7. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2018 году: Государственный доклад. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2019. – 254 с.
8. Чернов О.И. Развитие метода комплексной борьбы с угольной пылью, горными ударами, газовыделением, внезапными выбросами угля и газа и эндогенными пожарами в угольных шахтах // Нагнетание воды в

угольные пласты: Сборник научных трудов / ВостНИИ. – М.: Недра, 1965. – С. 7–64.

9. Мурашев В.И. Напряжения и деформации в угольных пластах, предварительно увлажненных через длинные скважины // Нагнетание воды в угольные пласты: Сборник научных трудов / ВостНИИ. – М.: Недра, 1965. – С. 90–97.

10. Исследование прочности и деформируемости горных пород / Под ред. А.И. Барона. – М.: Наука, 1973. – 207 с.

11. Борьба с угольной пылью в высокопроизводительных забоях / Под ред. Ф.С. Клебанова. – М.: Наука, 1975. – 116 с.

12. Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1966. – 283 с.

13. Черепанов Г.П. Механика разрушения горных пород в процессе бурения. – М.: Недра, 1987. – 308 с.

14. Kolumba D. Anelastic deformation of media // M.V. Cjrapciging NATO series Dorgrecht Miynoff . – 1984. – P. 499–524.

15. Седов Л.И. Механика сплошной среды: Учебное пособие для студентов университетов и втузов. – М.: Наука, 1976. – Т. 1, 2.

16. Williams M.Z. On the mathematical criterion for fracture // Thin – Shelle structures. – New Jersey, Prentice-Hall. – 1974. – P. 467–482.

17. Kolumba D. Anelastic deformation of media // M.V. Cjrapciging NATO series Dorgrecht Miynoff . – 1984. – P. 525–530.

18. А. с. № 1291847 СССР МПК G 01 N 15/02 Устройство для измерения концентрации дисперсной фазы аэрозоля / Бойко В.А. заявл. 20.04.84 г, опубл. 15.01.87, Сб. № 7.

19. А. с. № 1259042 СССР МПК E21 F 5/00 Устройство для отбора проб запыленного воздуха / Чулаков П.Ч. Заявл. 26.03.85 г., 11.02.86 г., № 35.

20. А. с. № 1265550 СССР МПК G 01 N 15/02 Устройство для определения концентрации пыли. заявл. / Балтренас П.Б. 15.07.85 г., опубл. 15.02.86, № 39.

21. Пат № 3524118 ФРГ МПК G 01 N 21/49 Стационарный тиндаллометр для подземных работ; заявл. 05.07.85 г., опубл. 15.01.87 г., № 7.

22. Пат. № 352411 ФРГ МПК G 01 N 21/49 Стационарный тиндаллометр. Заявл. 05.07.85 г., опубл. 15.01.87 г., № 7.

23. А. с. № 1583797 СССР, МПК G01 N15/02 Оптический пылемер / Джунько П.М., Закиров Д.Г., Поздняков О.В., Черныш А.В., Иванов В.В., Анисимов М.П. Заявл. 15.03.88 г., 1989 г., № 29.

24. Пат. № 2178882 Российская Федерация, МПК G01 N23/00, G01 N27/02. Концентратомер пыли / Петроченко М.В., Плотников В.П., Щербаков Г.М., Федорков В.Г; заявл. 19.02.00; опубл. 27.01.01 г.

25. Заявка № 96107578/25 Российская Федерация, МПК G01 N15/46 Способ определения концентрации твердой фазы пылегазовой среды / Н.В. Кривошеев, А.В. Муханов, В.В. Муханов. Заявл. 18.04.96 г., опубл. 27.05.98 г.

26. Пат. № 54200440 США, МПК G01N15/06 Прибор для измерения запыленности воздуха / Rel. Tek Corp. Завл. 01. 28.02.94 г., опубл. 30.05.95 г.

27. Пат. № 8905950 Франция, МПК G 01 N 1/10. Устройство для отбора проб пыли / Vauffette L. Заявл. 27.04.89 г., опубл. 02.11.90 г.

28. Хи Jianlin «Танькуан гунуэн. Explor». Приборы для измерения пыли // Drill and Tunn. – 1990. – № 5. – P. 32–35.

29. Сэжитан Гикэн. Разработка измерителя запыленности типа LV–5E. – 1990. – № 12. – С. 5–8.

30. Расширение контроля за пылью в США со стороны MSHA // MSHA Coal Age. – 1998. – № 2.

31. Tian Guozheng, Sun Jiping, Zhu Jiaming, Jia Tianshui Изучение компенсации загрязнения пылью и распределения интенсивности света при рассеянии света в датчике пыли // Coal society. – 1997. – № 6.
32. Новый прибор для оценки запыленности // Veceny H. Bergbau. – 1998. – № 9.
33. Yuan Junfang, Li Jianwen J. Прямой метод измерения шахтной пыли // Univ. Sci and Techn. Beijing. – 2000. – № 2.
34. Рейнхардт М., Армбрестер Л. Пылеизмерительная техника в особых условиях. Индивидуальный гравиметрический измерительный прибор СІР 10 // Глюкауф. – 1994. – № 5/6. – с. 15–16.
35. Рейнхардт М., Армбрестер Л. Тиндалометрический показывающий прибор ТМ–data // Глюкауф. – 1994. – № 5/6. – С. 25–30.
36. Палкин А.Б., and Кудряшов В.В. Непрерывное измерение концентрации пыли радиоизотопным методом Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), № 9, 2000, с. 110-112.
37. Заявка 4844025/25 СССР МПК G01N 15/02 Способ измерения запыленности газового потока / В.П. Наумов, В.А. Минко, О.Ф. Лапин, Ю.Г. Овсяников, В.Г. Чертов; заявл. 24.05.1990; опубл. 30.03.1993. № 1.
38. Lu T., Gao K., Shong J. Быстрый пылемер с микрокомпьютером // Mining Res. and Dev. – 1993. – P. 34–51.
39. Сметанин М.М. Пылегазовый контроль состава рудничного воздуха. // Всерос. науч.–метод. конф. «Безопас. жизнедеятельности человека». – 1994. – С.13–19.
40. А. с. №1341547 СССР МПК G01 N15/02 Прибор для измерения количества осевшей угольной пыли; заявл. 02.01.86; опубл. 10.05.87. № 3.
41. А. с. №1550365 СССР МПК G01 N15/00 Устройство для измерения количества осевшей пыли. заявл. 18.09.87; опубл.15.03.90 г. № 2.

42. А. с. №1583797 СССР МПК G01 N15/02 Оптический пылемер. Заявл. 15.3.88; опубл. 05.02.89. № 1.

43. А. с. № 1587376 СССР МПК G01 N1/22 Механическое устройство для отбора проб отложившейся угольной пыли; заявл. 17.03.88; опубл. 23.08.90. № 39.

44. А. с. № 1608353 СССР МПК E21 F5/00. Устройство контроля пылевзрывобезопасности горных выработок. Заявл. 18.04.1988; опубл. 23.11.1990.

45. А. с. № 1711049 СССР МПК G01 N23/22 Борьба с взрывоопасностью пыли; завл. 12.05.89; опубл. 07.02.92. № 5.

46. Заявка №3223319 ФРГ МПК G01 N15/6 Специальная система с компьютером для определения взрывоопасных участков в шахтах. Заявл. 16.6.82; опубл. 22.12.83. № 2.

47. Патент №4793710 США МПК G01 №21/5 Метод и аппаратура для измерения поверхностной плотности взрывчатой и инертной пыли в их отложениях. Заявл. 09.06.87; опубл. 27.09.88 г. № 2.

48. Патент №143413 Польша МПК G01 №23/203 Устройство для измерения процентного содержания компонентов сыпучей смеси. Заявл. 24.02.84; опубл. 30.09.88. № 3.

49. Заявка № 96107578/25 Российская Федерация МПК G01 N15/46 Способ определения концентрации твердой фазы пылегазовой среды. Заявл. 18.04.96; опубл. 27.05.98. № 4.

50. Патент № 2178882 Российская Федерация МПК G01 N23/00 Концентратомер пыли; заявл. 19.02.00; опубл. 27.01.01. № 1.

51. Патент № 2221145 Российская Федерация МПК E21F5/00 Устройство контроля пылевзрывобезопасности горных выработок; заявл. 10.01.04; опубл. 06.05.02.

52. Бабков С.В. и др. Устройство индикаторное оптоэлектронное для контроля пылевзрывобезопасности // Ж. «Уголь Украины». – 1990. – № 2. – С. 14–15.

53. Кривицкий М.Д. и др. Радиоизотопный датчик горючей составляющей осевшей угольной пыли // Сб. «Безопасность эксплуатации оборудования и машин в угольных шахтах». – 1990. – С.133–140.

54. Кривицкий М.Д. и др. Автоматизированная система дистанционного контроля пылевзрывобезопасности на добычном участке // Ж. «Уголь Украины». – 1990. – № 10. – С. 31–32.

55. Бабков С.В. и др. Контроль соотношения угольных и инертных компонентов в пылевых смесях по отражательной способности инфракрасного излучения // Сб. «Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда на угольных шахтах. – Макеевка: МакНИИ, 1988. – С. 112–118.

56. Нецепляев М.И. и др. Результаты экспериментальных исследований отложения угольной пыли в выработках добычного участка шахты // Сб. «Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда на угольных шахтах». – Макеевка: МакНИИ, 1988. – С. 56–72.

57. Кривицкий М.Д. и др. Определение радиоизотопным методом содержания негорючих веществ при осланцевании выработок // Сб. «Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда на угольных шахтах». – Макеевка: МакНИИ, 1988. – С. 101–105.

58. Нецепляев М.И. Разработка автоматизированной системы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Сб. «Создание безопасных условий труда в угольных шахтах». – Макеевка: МакНИИ, 1987. – С. 86–94.

59. Бабков С.В. и др. О приемочных испытаниях индикатора УОИ экспресс – контроля пылевзрывобезопасности // Уголь Украины. – 1995. – № 3. – С. 36–37.

60. Ищук И.А. Пылевзрывобезопасность предприятий ТЭКа: концепция и перспективы. – М.: МГГУ, 1999. – С. 67.
61. Siermann Erich Калориметрический способ исследования проб пыли в АО Lippe.-Gluckauf. – 1984. – С. 695–697.
62. Cashdollar Kennetth L. Три оптических пылемера горнорудного управления. Ж. Rept. Invest. Bur. Mines. – 1981. – № 8542. – С. 26.
63. Perlee H.E. и др. Монохроматический пылемер. IEEE Ind. Appl. Soc. 21. – 1986. – С.1582–1589.
64. Krzzystoli P.A. и др. Портативный анализатор соотношения угольной и инертной пыли. – Rotterdam, Boston, 1985. – С. 171–179.
65. Woods Thomas и др. Аналог оптического пылемера для породной пыли // Conf. IEEE APPL. Soc 23 rd Annu Meet. Pittsburgh, Pa. – 1988. – № 4. – P. 120–134.
66. Gereninge R.N. и др. Измерения содержания негорючих в пробах угольной шахтной пыли // Rept. Invest Bur. Mines. US Dep. Inter. –1988. – № 9155. – С. 1–14.
67. Sapko M.J. Оптический прибор для определения плотности осевшей пыли // Proc Sheyang, Int Symp. Dust. Explos, Shenyang. – 1987. – С. 349–369.
68. Хи Jianlin Совершенствование технологии измерения концентрации пыли // Танькуан гунуэн. Explor, Eng. (Drill and Tunn). – 1990. – № 5. – С. 21–22.
69. Bao Chao и др. Измеритель содержания породно–угольной пыли, предназначен для предупреждения взрыва угольной пыли // Chin. J. Sci. Instrum. – 1990. – № 1. – С. 28–33.
70. Pinkerton J.E. и др. Прибор для точечного измерения породной пыли // Rev. Sci. Instrum. – 1989. – № 11. – С. 3549–3551.
71. Chironic Nikolas P. Новый прибор для измерения содержания породной пыли // Coal. – 1989. – is: 26, № 5. – С. 107–108.

72. Smith G.L. и др. Стратегия контроля взрывов метаноугольной пыли в шахтах: исследования и разработки в ЮАР // J.S.Afr. Inst. Mining and Met. – 1999. – № 3. – P. 117–121.

73. Mobile Rockduster // American Mining Congress Journal. – 1983. № 15. – P. 12/

74. Бабков С.В. Контроль соотношения угольных и инертных компонентов в пылевых смесях по способности отражения инфракрасного излучения // Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах / МакНИИ. – Макеевка, 1988.– С. 112–118.

75. Sapko M.I., Greninger N.B., Watson R.W. Prevention and suppression of coal mine explosions // Proceedings of the 23 International conference of safety in mines research institutes. – Washington, 1989. – P. 318–328.

76. Система оперативного дистанционного контроля запыленности воздуха АДК-3 / Центральное бюро научно-технической информации Минуглепрома СССР. – Донецк, 1988. – 4 с.

77. М. Рейнхард, Л. Армбрестер. Тиндалометрическая установка FMA TMS1 // Глюкауф. – 1994. – № 5/6– С.18–23.

78. Пылемер PL-3. Руководство по эксплуатации. ООО «Комплексные автоматизированные системы». – Томск, 2014. – 24 с.

79. Описание типа средства измерения «Анализатор пыли ДАСТ» № 27366–04. – Санкт-Петербург, 2004. – 3 с.

80. Anne-Marie Feyer, Ann M. Williamson, National Institute of Occupational Health and Safety Sydney, Australia // 1991. – Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting, Volume: 35 issue: 15, P. 1100–1104.

81. Неволina Е.М. Снижение травматизма на горнодобывающем предприятии на основе развития компетентности персонала: Дис. ... канд.

техн. наук: 05.26.01 – Охрана труда (горная промышленность) / Е.М. Неволлина // Челябинск, 2004. – 128 с.

82. Бабенко А.Г. Теоретическое обоснование и методология повышения уровня охраны труда в угольных шахтах на основе риск–ориентированного подхода и многофункциональных систем безопасности: Дис. ... докт. техн. наук: 05.26.01 – Охрана труда (горная промышленность) / А.Г. Бабенко // Екатеринбург, 2018. – 259 с.

83. Механика горных пород и устойчивость выработок шахт Кузбасса / (под редакцией проф. В. Г. Кожевина). – Кемерово: Кем. книж. изд–во, 1993. – 348 с.

84. Приказ Ростехнадзора России от 19 ноября 2013 года № 550 «Правила безопасности в угольных шахтах». Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, N 7, 17.02.2014 (без приложений N 2-12 к Правилам).

85. РД 05–328–99 Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам // Серия 05. Нормативные документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в угольной промышленности. Выпуск.2. Сб. документов. – 3-е изд., исправленное. – М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2004.

86. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах России. – С.-П., ВНИМИ, 2000. – 70 с.

87. Приказ Ростехнадзора от 01.12.2011 N 678 Об утверждении Положения об аэрогазовом контроле в угольных шахтах (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2011 N 22812) (в редакции от 02.04.2015).

88. Клебанов Ф.С. Воздух в шахте. – М: Изд-во «Имилж–Сет», 1995. – 576 с.

89. Постановление Минтруда России от 24.10.2002 № 73 «Положение об особенностях расследования несчастных случаев на производстве в отдельных отраслях и организациях» // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – Москва, 13.01.03. – N 2.

90. Акт расследования группового несчастного случая на производстве, происшедшего в результате аварии 20.01.2013 года в 04 часа 20 минут с работниками ОАО «СУЭК–Кузбасс» Шахтоуправление «Котинское» Шахта № 7. – Киселевск, 2013. – 58 с.

91. Тиц С.Н. Человеческий фактор [Электронный ресурс]: электрон, учеб. пособие / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм, ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2012.

92. Российская энциклопедия по охране труда: [в 3 томах] / М-во здравоохранения и социального развития Российской Федерации; отв. ред. А.Л. Сафонов. – Москва : Изд-во НИЦ ЭНАС, 2007.

93. Вишнякова С.М. Профессиональное образование. Словарь. Ключевые понятия, термины, актуальная лексика. — М.: НМЦ СПО, 1999. – 538 с.

94. ГОСТ 12.0.002-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2019.

95. ICAO Doc 9806. Основные принципы учета человеческого фактора в руководстве по проведению проверок безопасности полетов. – Монреаль: ИКАО, 2010. – 341 с.

96. Андреев К.Ю., Павлов А.В. Человеческий фактор в системе обеспечения экономической безопасности Российской Федерации в сфере транспортной инфраструктуры // Вопросы российского и международного права. – 2015. – № 10. – С. 170–181.

97. Словарь бизнес-терминов. URL: <https://dic.academic.ru/>.

98. ГОСТ Р МЭК 62508-2014 Менеджмент риска. Анализ влияния на надежность человеческого фактора. – М.: Стандартинформ, 2015.
99. Doc 9807 Universal Security Audit Programme Continuous Monitoring Manual. – Монреаль: ИКАО, 2016. – 181 с.
100. Dr. James Reason, «Collective Mistakes in Aviation: «The Last Great Frontier». – 1992. – Flight Deck, Issue 4. – P. 245.
101. ГОСТ Р 12.0.010-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы управления охраной труда. Определение опасностей и оценка рисков (Переиздание). – М.: Стандартинформ, 2019.
102. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска. – М.: Стандартинформ, 2012.
103. Дружинин Г. В. Человек в моделях технологий: Учебное пособие в трех частях. Часть 1: Свойства человека в технологических системах. – М.: МИИТ, 1996. – 124 с.
104. Ермаков С.В. Превентивное регулирование человеческого фактора в морском судовождении / Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 5 (39). – С. 39–50.
105. Завьялов А.М. Повышение безопасности труда на железнодорожном транспорте на основе снижения влияния человеческого фактора: диссертация ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Завьялов Антон Михайлович. – Москва, 2018. – 395с.
106. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ
107. Методические рекомендации по проверке создания и обеспечения функционирования системы управления охраной труда. Приказ Роструда от 21.03.2019 N 77.

108. Ворошилов Я. С. Разработка критерия оценки угольных пластов по пылевому фактору: диссертация ... кандидата технических наук: 05.26.03. – Кемерово, 2002. – 140 с
109. Якоби О. Практика управления горным давлением. – М.: Недра, 1987. – 567 с.
110. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Можно ли прогнозировать разрушение? // Сб.: Будущее науки. – М.: Знание, 1983. – С. 99–107.
111. Саранчук В.И., Айруни А.Т., Ковалев К.Е. Надмолекулярная организация, структура и свойства угля. – Киев: Наукова Думка, 1988. – 191 с.
112. Hojdo S. Physics of fracture // Уобо–Јiho. – 1977. – № 109. – P. 42–47.
113. Моги К. Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1988. – 382 с.
114. Стефанов Ю.П. Численное исследование поведения упруго-идеальнопластических тел, содержащих неподвижную и распространяющуюся трещины, под действием квазистатических и динамических растягивающих нагрузок // Физ. мезомех. – 1998. – № 2. – С. 81–93.
115. Черепанов О.И, Смолин И.Ю, Стефанов Ю.П. Комбинированная вязко-упругопластическая модель среды для численного моделирования деформации и разрушения неоднородных материалов // Физ. мезомех. – 1998. – № 2. – С. 59–72.
116. Cherepanov O.I., Smolin I.Yu., Stefanov Yu.P. and Makarov P.V. Investigation of influence of internal structure of heterogeneous materials on plastic flow and fracture // Computational Materials Science. – 1999. – Vol./Issue: 16/1–4. – P. 25–31.
117. Balokhonov R.R., Stefanov Yu.P. Makarov P.V., Smolin I.Yu. Deformation and fracture of surface hardened materials on the meso- and

macrolevels. Numerical simulation // J. of Theor. and Appl. Frac. Mech. – 2000. – Vol. 33– P. 9–15.

118. Стефанов Ю.П., Смолин И.Ю. Численное исследование деформации и образования трещин в плоских образцах с покрытиями // Физ. мезомех. – 2001. – № 6. – С. 35–43.

119. Еремин Е.В., Лебедев В.В., Цикарев Д.А. Петрографические и физические свойства углей. – М.: Недра, 1980. – 236 с.

120. Касаточкин В.И., Ларина Н.К. Строение и свойства природных углей. – М.: Недра, 1975. – 158 с.

121. Аронов С.Г., Нестеренко Л.Н. Химия твердых горючих ископаемых. – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1969. – 371 с.

122. Скляр М.Г. Физико-химические основы спекания углей. – М.: Metallurgia, 1984. – 200 с.

123. Spiro C.Z., Kosky P.C. Space-filling models for coal, 2. Extension to coals of various ranks// Fuell. – 1982. – 61. – № 11. – P. 1080–1084.

124. Джейл Ф.Х. Полимерные монокристаллы. – Л.: Химия, 1968. – 551 с.

125. Ван-Кревелен Д.В., Шуер Ж. Наука об угле. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 303 с.

126. Patonie H. Entstehung der stein Kohle und der Kaustobiolithe uberhaupt. – Berlin: Borntrager, 1920. – 212 p.

127. Жемчужников Ю.А. Общая геология ископаемых углей. – М.: Углетехиздат, 1948. – 491 с.

128. Жемчужников Ю.А., Гинзбург А.И. Основы петрологии углей. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 400 с.

129. ГОСТ 9414-1973 Угли бурые, каменные и антрациты. Метод определения петрографического состава. Часть 3 – Введ. 01.01.76. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 12 с.

130. Петрографические типы углей СССР. – М.: Недра, 1975. – 248 с.
131. Международный толковый словарь по петрологии углей. – М.: Наука, 1965. – 266 с.
132. Айруни А.Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. – М.: Наука, 1987. – 310 с.
133. Драгон А., Мруз З. Континуальная модель пластически-хрупкого поведения скальных пород и бетона // Механика деформируемых твердых тел. Направления развития. — М.: Мир, 1983. – С. 163–188.
134. Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.
135. Поелуев А.П., Ищук И.Г. Подавление пыли различного дисперсного состава в угольных шахтах. – М.: ЦНИЭИУголь. – 1975. – 39 с.
136. Бурчаков А.С., Пережилов А.Е., Харьковский В.С. Научные основы гидрообеспыливания воздушных потоков // Изд-во вузов. Горный журнал. – 1991. – № 7. – С. 53–55.
137. Кирин Б.Ф., Ткачев В.В., Кудряшов В.В., Поздняков Г.А. Система учета персональных экспозиционных доз. // Тез. докл. на Международном аэрозольном семинаре. – М., 1994. – 56 с.
138. Никифорова О.И. Сравнение эффективности действия различных механизмов пылевого захвата водным аэрозолем // Горный журнал. – 1995. – № 5. – С. 64–67.
139. Лихачев Л.Я., Белоногов И.П., Медведев В.Т., Самченко В.Д. Влияние вещественного состава угля на пылевыделение при работе горных комбайнов // Вопросы вентиляции и борьбы с пылью и газом на угольных шахтах и разрезах. Науч. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: 1979. – Вып. 183. – С.53–59.

140. Ищук И.Г., Забурдяев Г.С., Журавлев В.П. и др. Борьба с угольной пылью в высокопроизводительных забоях. – М.: Наука, 1975. – 115 с.
141. 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.
142. Пережилов А.Е., Лукаш А.С., Кочетов В.Г. Снижение пневмокониозоопасности атмосферы горных выработок // В кн. Научные основы шахт будущего. – М.: МГИ, 1983. – С. 136–139.
143. Онтин Е.И., Кустов И.И. Исследование дисперсного состава пыли угольных шахт // Совершенствование вентиляции и способов борьбы с пылью и газом в угольных шахтах. Научн.сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. – М. – 1978. – Вып. 171. – С. 53–59.
144. Мухелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения. – М.: Наука, 1962. – 600 с.
145. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – Л.: Химия. – 1974. – 203 с.
146. Швиндлер М.И. Статическая гидродинамика пористых сред.– М.: Недра, 1985. – 288с.
147. Дуве К., Ткачев В.В. Измерение и нормирование аэрозолей фиброгенного действия. – М., 1982. – 256 с.
148. Хухрина Е.В. Ткачев В.В. Пневмокониозы и их профилактика. – М., 1968. – 129 с.
149. Patrick Sebastien, Reymond Begin. Этиопатогенез пневмокониозов // Энциклопедия по безопасности и гигиене труда. – М., 2001. – Т. 3. – С. 190.

150. Трубицына Н.В., Ворошилов Я.С., Макаров П.В., Смолин И.Ю., Черепанов О.И. Механизмы разрушения угля и образование пылевых частиц // Международная конференция Байкальские чтения – II по моделированию процессов в синергетических системах. – Максимиха, 2002. – С. 30–32.

151. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Чернов О.И., Трубицына Н.В., Ворошилов Я.С. Упруго-вязкопластическая деформация и разрушение угля на мезоскопическом уровне // Физическая мезомеханика. – 2002. – № 3. – С. 60–72.

152. Трубицын А.А., Макаров П.В., Черепанов О.И., Ворошилов С.П., Трубицына Н.В., Смолин И.Ю., Соболев В.В., Ворошилов Я.С., Киселев В.В. Адаптация методов мезомеханики к исследованию процессов деформации и разрушения угля / Кузбасс–ЦОТ. – Кемерово, 2002 – С. 115.

153. Булат А.Ф., Дырда В.И. Фракталы в геомеханике. – Киев: Наукова думка, 2005. – 358 с.

154. Мондельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

155. Федосеев В.Б. Использование фрактальной геометрии при термодинамическом описании трёхмерных элементов кристаллической структуры // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2. – С. 78–83.

156. Якушина, О. А. О возможности прогнозной оперативной оценки качества рудного сырья методом рентгенотомографии / О. А. Якушина. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2009. — № 12 (12). — С. 125-127. — URL: <https://moluch.ru/archive/12/965/> (дата обращения: 08.06.2020).

157. Lingta Mao. Porosity Analysis Based on CT Images of Coal under Uniaxial Loading Lingta / Mao, Peng Shi, Hui Tu, Liqian An, Yang Ju, Nai Hao // Scientific Research Publishing. - 2012 p. 187-195.

158. Trond K. Combining high-fidelity helical microtomography With region-of-interest Scanning for improved core Characterisation // The International Symposium of the Society of Core Analysts held in Austin. – 2011. – P. 185.

159. Permana A.K. 3-D Imaging of Cleat and Micro-cleat Characteristics, South Walker Creek Coals, Bowen Basin, Australia: Microfocus X-ray Computed Tomography Analysis // Indonesian Journal of Geology. – 2012. – Vol. 7. – No. 1. – P. 1–9.

160. Трубецкой К.Н., Рубан А.Д., Викторов С.Д., Малинникова О.Н., Одинцев В.Н., Кочанов А.Н., Учаев Д.В. Фрактальная структура нарушенности каменных углей и их предрасположенность к газодинамическому разрушению // Доклады академии наук. – 2010. – Т. 431. – № 6. – С. 818–821.

161. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.

162. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. – 235 с.

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

164. Иванова В.С. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. – Уфа, 1998. – 368 с.

165. N. Otsu A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1979. –P. 62–66.

166. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Логинова В.И. Твердотельные фрактальные структуры // Углеродные наноструктуры для альтернативной энергетики. Наносистемы: синтез, свойства, применение. Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2005. – № 9 (29). – С. 23–29.

167. Ворошилов А. С. Исследование закономерностей влияния влаги на процесс самонагрева угля: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.26.03 / Ворошилов Алексей Сергеевич; [Место защиты: Науч. центр ВостНИИ по без. работ в горной промыш.]. – Кемерово, 2012.

168. Псху А.В. Решение краевой задачи для уравнения с частными производными дробного порядка // Дифференциальные уравнения. – 2003. – Том 39. – № 8. – С. 1092–1099.

169. Правила безопасности в угольных шахтах. Книга 3. Инструкция по борьбе с пылью и пылевзрывозащите / Госгортехнадзор России. – Липецк: Липецкое издательство, 1999. – 109 с.

170. Нецепляев М.И., Любимова А.И., Петрухин П.М. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. – М.: Недра, 1992. – 298 с.

171. Лихачев Л.Я., Трубицын А.В., Белоногов И.П., Яковлев Н.И. Способы борьбы с пылью в шахтах при работе выемочных комбайнов. Кемерово, 1970. – 100 с.

172. Cybulski W.B. Wybuchy pyłu weglowego i ich zwalczanie – Katowice, Wydaron. «Slgsk», 1973. – 451 p.

173. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. – Мн.: Современная школа, 2005. – 608 с.

174. Пат. №2221145 Российская Федерация МПК 6 E 21 F 5/00 Устройство контроля пылевзрывобезопасности горных выработок / Трубицын А.А., Гринюк А.А., Трубицына Н.В., Буймов К.К., Соболев В.В., Попов М.С., Ромашкин Д.А.; заявл. 06.05.2002; опубл. 10.01.2004.

175. Закутский Е.Л. Проблемы и перспективы пылевого мониторинга в угольных шахтах // ГИАБ. – 2015. – № 10. – С. 61–76.
176. Палкин А.Б. Анализ радиометрических методов контроля пылеотложения // ГИАБ. – 2007. – № 5. Аэрология. – С. 13–35.
177. ГОСТ Р 51569-2000 Пыль инертная. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000.
178. ГОСТ 13455-91 (ИСО 925-80) Топливо твердое минеральное. Методы определения диоксида углерода карбонатов (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.
179. ГОСТ 857-95 Кислота соляная синтетическая техническая. Технические условия (с Поправкой). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.
180. ГОСТ 2184-2013 Кислота серная техническая. Технические условия (с Поправками). – М.: Стандартиформ, 2014.
181. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (с Изменениями N 1, 2). – М.: Стандартиформ, 2007.
182. ГОСТ 3956-76 Силикагель технический. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3). – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997.
183. ПБ 05–618–03 Правила безопасности в угольных шахтах. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 296 с.
184. Кудряшов В.В., Воронина Ю.В. Направления в разработке приборов пылевого контроля // Сб. Проблемы рудничной аэрологии. – М.: Наука, 1974, – С. 209–214.
185. Попов В.А., Любецкий В.Б., Печенникова Е.В. Об измерении расхода воздуха в гигиенических исследованиях. Гигиена и санитария. – 1974. – № 2. – С. 100–102.

186. Экспериментальная ядерная физика / Ред. Э. Сегрэ. – М.: Изд. иностр. лит., 1955. – 385 с.
187. Измайлов Г.А. Применение радиоактивных изотопов и ядерных излучений в промышленности. Вып. 14. – М.: ЦИТЭИ, 1961. – С. 73–76.
188. Дьяконов С.А. Пылемер «Приз» // Безопасность труда в промышленности. – 1973. – № 9. – С. 23–45.
189. Быков А.М., Лихачев Л.Я., Онтин Е.И., Петров И.П. Косвенные методы // В кн.: Способы борьбы с пылью на угольных шахтах. – М.: Недра, 1968. – С. 176–183.
190. Пат. SU1807336 СССР, Коломиец С.М., G01 N 15/02 Способ определения характеристик взвешенных частиц и устройство для его осуществления / Коломиец С.М., 20.11.90, 7.04.93, Бюл. № 13. – С.5.
191. Пат. 2006827 Российская Федерация, МПК G01 N 15/02, Устройство для измерения объемной концентрации твердых частиц в потоках / Бурляев Н.Н., Сизых В.Я., 4868830/25, 27.09.90, 30.01.94, Бюл. № 2.
192. Кохановский А.А., Зега Э.П. Ослабление, поглощение и рассеяние света аэрозольными частицами: обзор приближенных решений / Аэрозольная наука и технологии. Лекции ведущих исследователей и разработчиков СНГ// Материалы международного аэрозольного симпозиума (21–25 марта, 1994, г. Москва), т. 3. – М.: Изд-во НИФХИ им Карпова, 1994. – С. 57–101.
193. Малыгин Н.А., Подольский А.А., Поминов Е.И. О пьезоэлектрическом способе определения дисперсного состава аэрозолей // Труды ЛИАП. – 1974. – Вып. 86. – С. 51–57.
194. А.с. № 890153 СССР МПК G01N 15/00 Электрозарядный пылемер / Решидов И.К.; заявл. 15.12.1981. опубл. 18.03.1980; № 1.
195. Патент №1345095 Великобритания МПК G01N15/06 Способ измерения массы и концентрации частиц; заявл. 03.07.1974; опубл. 05.01.1976; № 1.

196. Патент № 1178516 Великобритании МПК G01F1/30 Particle Flow Sensing Device; заявл. 29.09.1967; опубл. 21.01.1970; № 1.
197. Анализатор пыли АТМАС / БВЕК 610000.001 РЭ. – Москва, 2016. – С. 36.
198. Зуев В.Е., Кауль Б.Е., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. – Новосибирск: Наука, 1986. – 186 с.
199. Першин С.М. Портативные аэрозольные лидары нового поколения с безопасным для глаз уровнем излучения / Аэрозольная наука и технологии. Лекции ведущих исследователей и разработчиков СНГ // Материалы международного аэрозольного симпозиума (21–25 марта, 1994, г. Москва), т. 3. – М.: Изд-во НИФХИ им Карпова, 1994. – С. 102–122.
200. Патент SU532790A1 СССР МПК G01N15/02 Оптический пылемер / Труш В.И.; заявл. 16.07.1976; опубл. 25.10.1976.
201. Акинфиев В.И. Контроль запыленности отходящих газов при продувке жидкой ванны пылегазовой смесью // Бюллетень ЦНИИТЭИЧМ–1969. – № 6. – С. 45–59.
202. Русанов А.А. Справочник по пыли и золоулавливанию. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
203. А.с. 1098017 СССР МКИ G08B 17/10 Оптический сигнализатор концентрации пыли / В.Ю. Куренев, В.Ф.Петриш, В.Н. Сиротюк; Львов, с-х инт-т; заявл. 28.10.82, N 3506898/18–24, опубл. в Б.И, 1984, N 22.
204. Ищук И.Г., Карагодин Л.Н. Опыт организации пылевого контроля на шахтах ФРГ, Великобритании и Франции: Обзор / ЦНИЭИуголь. – М., 1985. – 98 с.
205. Устройство для измерения концентрации взвешенной в воздухе пыли. Hashina Taniuo. – 1985. – Юацу гидзюцу, Hydraul and Pneum. – № 3. – P. 53–57.

206. Zenker P. Untersuchung zur Frage der nichtgeschwindigkeits–gleichen Teilstromentnahme bei der Staubgehaltsbestimmung in stromenden Casen. – 1971, Staub– Reiheltung der Luft 6. – P. 252–256.
207. Карпов Е.Ф., Басовский Б.И. Контроль проветривания и дегазации в угольных шахтах. – М.: Недра, 1994. –336 с.
208. Flammable gas and dust monitoring. Practical problems of monitoring dust and locating, gas sensor. Moore R.C. «Meas. and Contr.», 1984. – Vol. 17. – № 1. – P. 17–19.
209. Контроль загрязнения окружающей среды – 82 // Зарубежная электронная техника. – 1982. – № 12. – С. 82–84.
210. Кислер С.Я. и др. Контроль работы газоочистки агасмерепромных печах металлургических заводов // Труды ВНИИПИЧерметэнергоочистка. – Харьков: Металлургия, 1969. – С. 46–56.
211. Bestimmung des Staubgeholtes // Chem. – inlag+Terfahren. – 1976. – № 1. – P. 50–51.
212. Румянцев К.Е., Семенов В.В. Электронные средства контроля запыленности рудничной атмосферы: Учебно-методическое пособие:– Шахты: ДГАС. – 1998. – 54 с.
213. Торовец А.Г. Датчик концентрации аэрозолей // Приборостроение. – 1975. – № 18. – С. 105–107.
214. Yan Zhang, Wenzhong Lou, Maohao Liao. Research on Dust Concentration Measurement Technique Based on the Theory of Ultrasonic Attenuation // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 986 (2018) 012026 // DOI :10.1088/1742–6596/986/1/012026.
215. Mingxu Su. etc. Measurement of Particle Size by Ultrasonic Attenuation [J] // Journal of Instrumentation. – 2004. – № 25. – P. 1–2.

216. Mingxu Su. etc. Determination of Particle Size and Concentration in Suspension by Ultrasonic Attenuation [J] // Acta acoustica Sinica. – 2004. – № 5. – P. 440–444.

217. Ni W. Ultrasonic attenuation model for measuring particle size and inverse calculation of particle size distribution in mineral slurries [J] // Journal of Central South University (English Edition). – 2006. – № 13 (4). P. 445–450.

218. ГОСТ 24104-2001 Весы лабораторные. Общие технические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.

219. О введении в действие отраслевого стандарта «Рудничная атмосфера. Методы контроля запыленности» (ОСТ 153-12.0-004-01). Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/901808265>.

220. Л.Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.

221. Ярош А.С. Разработка математического алгоритма расчета концентрации пыли для прибора ПКА–01 // Вестник Научного центра ВостНИИ по безопасности работ в угольной промышленности. – 2007. – № 2. – С. 62–65.

222.. Ворошилов Я.С, Седельников В.Е., Ярош А.С. Разработка программного комплекса для регистрации прибора контроля запыленности воздуха ПКА–01 // Неделя горняка–2008, ГИАБ. – Москва, 2008. – С. 127–139.

223. ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-99) Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь i. – М.: Стандартиформ, 2008.

224. ГОСТ Р 50760-95 Анализаторы газов и аэрозолей для контроля атмосферного воздуха. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1995.

225. ГОСТ 12997-84 Изделия ГСП. Общие технические условия (с Изменениями N 1-4). – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997.

226. Об утверждении Положения об аэрогазовом контроле в угольных шахтах (с изменениями на 25 сентября 2018 года) (редакция, действующая с 1 января 2020 года) // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, N 14, 02.04.2012.

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

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

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

230. Пеккер Я.Л. Егоров В.Е. Исследование и анализ пылесжигания с учетом неравномерности процессов во времени Теплоэнергетика. – Госэнергпроиздат, 1971. – С. 549–550.

231. Румянцев К.Е., Семенов В.В. Электронные средства контроля запыленности рудничной атмосферы: Учебно-методическое пособие. – Шахты: ДГАС. – 1998. – 54 с.

232. Buist R.J. and Lau P.G. Theoretical Analysis of Thermoelectric Cooling Performance Enhancement Via Thermal and Electrical Pulsing // 15th International Conference on Thermoelectrics, Pasadena, California, March 25–March 28, 1996. – 1996. – 4 p.

233. Украинский Л.З., Обновленский П.А. О возможности измерения характеристик дисперсного состава взвесей с помощью ультразвука // Успехи физических наук. – 1968. – № 8. – С. 980–984.

234. Стеркин А.Е. Анализ погрешности ультразвукового способа измерения степени дисперсности взвеси // В кн.: Автоматизация производства строительных материалов. Вып. 4. – М.: Стройиздат, 1971. – С. 145–154.

235. Матвеев В.С., Никитина А.Б. Современные средства контроля промышленных выбросов в атмосферу // ТС–4: Экспресс-информация по материалам фирмы Hitachi (Япония); ЦНИИТЭИприборостроения. Вып.2. – М., 1981. – 68 с.

236. Ищук И.Г., Карагодин Л.Н. Опыт организации пылевого контроля на шахтах ФРГ, Великобритании и Франции: Обзор // ЦНИИЭУголь. – М., 1985. – 142 с.

237. Реферативные журнал (№ 84) «Приборы и системы контроля окружающей среды». – М.: ВИНТИ, 1983. – С. 136.

238. Zenker P. Untersuchung zur Frage der nichtgeschwindigkeits-gleichen Teilstromentnahme bei der Staubgehaltsbestimmung in stromenden Casen, Staub. – 1971. – Reiheltung der Luft, Is. 6. – P. 252–256.

239. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.

240. Карпов Е.Ф., Басовский Б.И. Контроль проветривания и дегазации в угольных шахтах. – М.: Недра, 1994. – 336 с.

241. Техническое задание на прибор оперативного контроля пылевзрывоопасности горных выработок. Отчет о НИР / ВостНИИ; рук. И.И. Кустов, Инв. № 02910027826. – Кемерово, 1990. – 60 с.

242. Клименко А.П., Королев В.И., Шевцов В.И. Непрерывный контроль концентрации пыли. – Киев.: Техника, 1980. – 182 с.

243. Ищук И.Г., Поздняков Г.А.. Средства комплексного обеспыливания горных предприятий. – М.: Недра, 1991. – 253 с.

244. А.с. 1098017 СССР МКИ G08B 17/10 Оптический сигнализатор концентрации пыли / В.Ю. Куренев, В.Ф.Петриш, В.Н. Сиротюк; Львов, с-х инт-т; заявл. 28.10.82, N 3506898/18–24, опубл. в Б.И. 1984, N 22.
245. Русанов А.А. Справочник по пыле- и золоулавливанию. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
246. Исследование и разработка датчика запыленности воздуха для систем автоматического контроля загрязнения атмосферы. Отчет НИР (промежуточный) / Ленинградский ин-т авиационного приборостроения; рук. В.И. Турубаров, Инв. № 02910036698. – Ленинград, 1991. – 42 с.
247. Месропян Э.А, Ованесян А.Г., Хуршудян С.А. Фотометрические анализаторы количества и размеров частиц. – М., 1985. – 21 с.
248. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / пер. с англ. – М., 1973. – 540 с.
249. Маликов В.Т. Автоматизация проектирования оптоэлектронных устройств контроля // Приборы и системы управления. –1989.– № 6. – С. 7–10.
250. Бреслер П.И. Оптические абсорбционные ГА и их применение. – Л.: Энергия, 1980. – 163 с.
251. Павленко В.А. Газоанализаторы. – М.: Машиностроение, 1965. – 294 с.
252. Франко Р.Т., Кадук Б.Г., Кравченко А.А. Газоаналитические приборы и системы. – М.: Машиностроение, 1983. – 128 с.
253. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. – М.: Гостехиздат, 1961. – 288 с.
254. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. – М.: Издательство иностранной лит-ры, 1961. – 536 с.
255. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых ИК лучей. – М.: Сов. радио, 1966. – 318 с.
256. Зуев В.Е. Распространение видимых и ИК волн в атмосфере. – М.: Сов. радио, 1970. – 496 с.

257. Клименко А.П. Методы и приборы измерения концентрации пыли. – М. Химия, 1978. – 208 с.
258. Dr-1 16-Reauchdichtemesgerat // ATM+Messtechn. Prax. – 1975. – N 477. – P. 234.
259. Ворошилов Я.С. Многоуровневая модель компетентности работников в сфере безопасности труда / Я.С. Ворошилов // Горная промышленность. – 2020. – № 2. – С. 125–129.
260. 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.
261. Азимов Э.Г., Щукин А.Н. Новый словарь методических терминов и понятий (теория и практика обучения языкам). – М.: Издательство ИКАР, 2009. – 448 с.
262. Никулин А.Н., Клячина Я.А. Надежность человеческого фактора // Проблемы Науки. – 2017. – № 7 (89).
263. Shelford V.E. Some Concepts of Bioecology // Ecology. – 1931. – № 12(3). – P. 455–467.
264. Федеральный закон «О специальной оценке условий труда» от 28.12.2013 N 426–ФЗ
265. ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация // Сб. ГОСТов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.