

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук**

На правах рукописи



МИТИШОВА НАТАЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ВЗРЫВОВ СУЛЬФИДНОЙ ПЫЛИ
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОЛЧЕДАНЫХ РУД**

Специальность

25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)»

**Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
профессор, доктор технических наук
Рыльникова Марина Владимировна**

Москва 2020

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. УСЛОВИЯ ВЗРЫВАНИЯ КОЛЧЕДАННЫХ РУД И СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЗРЫВОВ СУЛЬФИДНОЙ ПЫЛИ	9
1.1. Обобщение опыта отработки колчеданных месторождений и анализ методов, обеспечивающих безопасность горных работ по фактору взрыва сульфидной пыли	9
1.2. Механизм и условия формирования взрывоопасного сульфидного облака ..	18
1.3. Меры и факторы безопасности горных работ при отработке колчеданных месторождений для предотвращения взрывов сульфидной пыли	24
1.4. Методика оценки взрывобезопасных параметров горных работ	32
1.5. Цель, задачи и методы исследований.....	35
2. РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОЛЧЕДАННЫХ РУД.....	38
2.1. Уточнение понятий и определений, связанных с обеспечением взрывобезопасности при разработке колчеданных месторождений, показателей опасности взрывчатости сульфидной пыли.....	38
2.2. Совершенствование методов определения взрывчатости сульфидной пыли	43
2.3. Обоснование механизма формирования и распространения взрывной волны в облаке сульфидной	52
2.4. Разработка программы-методики проведенного исследования	58
Выводы по главе 2	67
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ И ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВОВ СУЛЬФИДНОЙ ПЫЛИ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ	69
3.1. Геолого-структурная оценка руд месторождений Новый Сибай, Сентачан и Шануч	69

3.2.	Оценка взрывоопасности высокосульфидных руд и вмещающих пород Сибайского медно-колчеданного месторождения	83
3.3.	Определение показателей взрывоопасности пыли, формирующейся в ходе подземных горных работ золото-сурьмяного месторождения Сентачан	96
3.4.	Оценка пород и руд кобальт-медно-никелевого месторождения Шануч, а также взрывоопасности пыли, формирующейся в ходе подземных горных работ	104
3.5.	Алгоритм оценки склонности сульфидной пыли к взрывоопасности при подземной разработке месторождений колчеданных руд.....	108
	Выводы по главе 3	114
4.	РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ ПО ФАКТОРУ ВЗРЫВЧАТОСТИ СУЛЬФИДНОЙ ПЫЛИ ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СИБАЙ, ШАНУЧ И СЕНТАЧАН	116
4.1.	Технологические рекомендации для убогосульфидных руд	116
4.2.	Технологические рекомендации для руд с высоким содержанием серы	118
4.3.	Расчет вероятности возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывом сульфидной пыли	124
	Выводы по 4 главе	142
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	143
	Список литературы	147

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное развитие минерально-сырьевой базы России неразрывно связано с освоением месторождений колчеданных руд и необходимостью обеспечения безопасности горных работ в изменяющихся условиях недропользования. При этом неизбежно вовлекаются в процесс добычи руды с всё более низким содержанием ценных компонентов, что влечет за собой рост масштабов извлечения запасов из недр, изменение минерального состава вовлекаемых в эксплуатацию сульфидных руд и пород и технологии их разработки. Важно отметить, что, в связи с увеличением объемов вовлекаемых в эксплуатацию сульфидов, происходит увеличение извлекаемых мощностей, массы ВВ, изменяются технологии и объем бурения, что приводит к росту количества формируемой сульфидной пыли и вероятности риска ее воспламенения. В практике горных работ взрывы сульфидной пыли, достаточно часто возникают при подземной разработке месторождений колчеданных руд: медно-цинковых, свинцово-цинковых, медно-никелевых, антимонитовых и др. Это обуславливает необходимость проведения исследований и усовершенствования методик изучения взрывчатых свойств сульфидной пыли, разработку требований промышленной и экологической безопасности ведения горных работ.

Безопасность ведения горных работ в забоях, опасных по взрыву сульфидной пыли, обеспечивается осуществлением ряда специальных мероприятий, выбор которых в современных условиях требует обоснованного научно-методического подхода на базе проведения фундаментальных исследований.

В свое время советская научная школа охраны труда создала серьезный научно-методический задел для предотвращения взрывов сульфидной пыли. В результате этого аварий по данному фактору долгое время не происходило. Однако, разработанные в советское время технические, методические и практические решения по обеспечению безопасности горных работ не могли в то время учесть произошедшие современные изменения в горном производстве, возможностей инновационного горного оборудования, технологий, поэтому напрямую известные, разработанные ранее технологические решения не могут быть эффективно применимы в новых условиях. Рост масштабов добычи, переход на технологию бурения, взрывания скважин большого диаметра, проходки выработок механизированным способом с применением комбайнов, секционного взрывания восстающих при проходке их методом VCR повлекли общее

увеличение выделения пыли в атмосферу рудника с ростом доли тонкодисперсных частиц. При разработке месторождений сульфидных руд это влечет рост риска развития экзотермических процессов и взрывоопасности рудничной атмосферы.

Согласно Инструкции по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритсодержащие руды, утвержденной Министерством металлургии СССР в 1991 году, нижний взрывоопасный предел содержания серы в руде составляет 35%. Однако, взрывы сульфидной пыли в настоящее время фиксируются и при более низком содержании серы в рудах.

Анализ практики отработки месторождений колчеданных руд показал, что действующие нормативные документы в области промышленной безопасности для опасных объектов горнодобывающей промышленности в большей части устарели и не содержат требований и указаний по ведению подземных горных работ на месторождениях, опасных по взрывам и возгоранию сульфидной серосодержащей пыли, отвечающих современным техническим условиям. Таким образом проблема обеспечения взрывобезопасности при разработке месторождений колчеданных руд является весьма актуальной и требует своевременного решения и закрепления в нормативной документации.

Целью работы является изыскание технологических решений по снижению рисков взрывов сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд.

Идея работы: технологические решения по предотвращению взрывов сульфидной пыли должны базироваться на оценке параметров взрывчатости сульфидной пыли с учетом масштабов и технологии ведения буровзрывных работ, протяженности зоны орошения подготовительных выработок перед взрывом, структурно-текстурных характеристик горных пород, фракционного состава пылевых частиц, провоцирующих взрыв.

Достижение поставленной цели и реализация идеи обеспечены решением научно-практических задач:

- проанализирован и обобщен опыт безопасного ведения горных работ по фактору взрыва сульфидной пыли при отработке месторождений колчеданных руд, обобщены нормативные документы по вопросам взрывобезопасности;

- разработана методика и выполнены исследования взрывчатых свойств сульфидной пыли;
- выявлены неучтенные ранее факторы обеспечения безопасности ведения горных работ и разработаны мероприятия по снижению риска возникновения взрывов сульфидной пыли;
- оценена вероятность возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывом сульфидной пыли и перспективы ее снижения при реализации компенсирующих мероприятий.

Объектом исследования явились руды, породы и пыль, формируемая при разработке месторождений колчеданных руд Шануч, Сентачан и Сибайское, а также условия разработки месторождений, потенциально опасных по взрывам сульфидной пыли.

Методы исследований включали сбор, обобщение опыта ведения горных работ на предприятиях, опасных по взрывам сульфидной пыли, обзор и анализ результатов научных исследований отечественных и зарубежных ученых, практического опыта в области обеспечения безопасности по фактору взрыва сульфидной пыли, исследование факторов и процессов, влияющих на пылевзрывоопасность с использованием методов: оптической микроскопии, включающей оптико-петрографический и минераграфический анализы, рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), синхронный термический анализ (СТА) с последующим научным обобщением и статистической обработкой полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Пылевые частицы сульфидов, размером более 100 мкм, не являются термически активными; при меньшем размере частиц склонность их к взрывоопасности повышается с увеличением доли мелких фракций по экспоненциальной зависимости.

2. Доказано, что для предотвращения взрыва сульфидной пыли длина орошения водой выработки (l_{op} , м), прилегающей к месту взрыва, не является величиной постоянной, а зависит от массы взрываемого ВВ ($M_{ВВ}$, кг), коэффициента шероховатости стенок выработки (β), площади сечения выработки ($S_{сеч}$, м²), коэффициента неоднородности минерального состава сульфидной пыли в различных классах крупности пылевых частиц (k_s):

$$l_{op}=28,95 \cdot \ln(M_{ВВ})-16,26 \cdot \ln(\beta)-24,66 \cdot \ln(S_{сеч})+8,72 \cdot \ln(k_s)-121,4.$$

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается:

- достаточным объемом проанализированной и обобщенной информации отечественных и зарубежных исследований;
- корректностью принятой модели возникновения и распространения взрыва сульфидной пыли;
- комплексным анализом факторов, влияющих на возникновение взрывов сульфидной пыли с учетом современных тенденций развития горных работ;
- использованием современных методов исследования.

Научная новизна работы: методика обоснования условий предотвращения взрыва сульфидной пыли и оценки взрывоопасности при разработке месторождений колчеданных руд, учитывающей текстурно-структурные особенности строения и вещественного состава колчеданных руд и пород, а также размер термически активных частиц сульфидной пыли.

Практическая значимость работы заключается во внедрении авторской методики по оценке взрывоопасности пыли, определении условий, предотвращающих взрыв сульфидной пыли: орошение контура выработки водой на заданное расстояние; ограничение диаметра буровых скважин и шпуров – не более 89 мм; отказ от применения систем разработки с массовым обрушением руд и пород без профилактического заиливания; ограничение объемов массы единовременно взрывааемых зарядов ВВ; исключение присутствия в контуре ведения взрывных работ открытых проводников, применение надежного изоляционного покрытия электропроводов; отказ от проходки восстающих методом секционного взрывания и механического бурения; использование при бурении скважин и шпуров водоподавления, а при взрывании - ВВ, не склонных к саморазогреву при контакте с сульфидной пылью. Разработаны технологических рекомендаций для безопасной отработки месторождений колчеданных руд Шануч, Сентачан и Сибайское.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались на Международной научно-практической конференция «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр земли» (г. Москва, 2017), Международной научно-практической конференции «Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ» (г. Магнитогорск, 2018), 4-ой Международной конференции по проблемам рационального природопользования

«Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства» (г. Тула, 2018), III Международной научной школе академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (г. Москва, 2018), XXVI-ой Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2019), Международной научно-технической конференции «Решение экологических и технологических проблем горных производств на территории России, ближнего и дальнего зарубежья» (г. Москва, 2019), X Международная конференция «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (г. Магнитогорск, 2019), 14-ой Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, 2019).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 15 работах, 3 из которых – в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из 4 глав, введения и заключения, изложенных на 157 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка, 15 таблиц, список литературы из 152 наименований.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. УСЛОВИЯ ВЗРЫВАНИЯ КОЛЧЕДАННЫХ РУД И СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЗРЫВОВ СУЛЬФИДНОЙ ПЫЛИ

1.1. Обобщение опыта отработки колчеданных месторождений и анализ методов, обеспечивающих безопасность горных работ по фактору взрыва сульфидной пыли

Безопасность жизнедеятельности человека в производственной среде оценивается частотой возникновения несчастных случаев, заболеваний и производственного травматизма. Практически любой производственный процесс в большей или меньшей степени связан с риском нанесения вреда здоровью трудящихся. Именно поэтому любое предприятие обязано обезопасить своих сотрудников. Обеспечение безопасности ведения горных работ всегда должно являться первостепенной задачей руководства [80].

Первым зафиксированным взрывом сульфидной пыли был взрыв на шахте «Unitedverde» (США, штат Аризона), произошедший в 1926 г [89]. Авария повлекла за собой человеческие жертвы и большие разрушения. Последствия взрыва сульфидной пыли напоминали по силе взрыв каменноугольной пыли, после чего наблюдался поток горящих сульфидных газов, ворвавшийся в прилегающих выработках. Осажденная после взрыва сульфидная пыль получила при этом красновато-бурый оттенок, вместо зеленоватого, который она имела до этого.

Взрывы сульфидной пыли были зафиксированы на рудниках Норанды (Канада) при разработке колчеданных месторождений [1, 145], взрывы сопровождалось выделением большого количества сернистого газа, и в ряде случаев они послужили причиной возникновения рудничных пожаров. На одной из этих шахт с 1949 по 1963 гг. было зарегистрировано 76 пожаров, вызванных взрывами сульфидной пыли.

На Урале первые взрывы колчеданной пыли были зафиксированы в 20-х годах прошлого столетия на Калатинском, Белореченском и Карабашском медноколчеданных рудниках. К 1934-1936 гг. число взрывов колчеданной пыли значительно возросло, что было связано с переходом на взрывчатые вещества большей мощности. На Гайском руднике при производстве массовых взрывов за период с 1994 по 1998 гг. зафиксирован 81 взрыв сульфидной пыли, что составило 32 % от всех взрывов [94].

Наиболее острая взрыво- и пожароопасная обстановка проявилась на Дегтярском руднике в период с 1940-1950 гг [11]. Добываемая руда представляла собой медистый и серный колчедан. Серный колчедан состоял, главным образом, из пирита, содержание в нем меди – 0,32%, серы – 49,8%.

На сегодняшний день, очевидно, что проблема пылеобразования с изучением условий формирования и свойств рудничной атмосферы, включая оценку состава и размера техногенных частиц пыли, находится на стадии накопления информации и поиска новых идей. Так, при разработке колчеданных, полиметаллических месторождений причиной случайных промышленных взрывов, в частности неконтролируемых взрывов сульфидной пыли, является развитие экзотермической химической реакции.

На рисунках 1.1-1.3 приведена статистика за последние годы по взрывам сульфидной пыли в зависимости от содержания серы в руде при разработке колчеданных месторождений с различной степенью тяжести последствий подобного рода инцидентов и аварий: от оплавления вентиляционных рукавов, простоев оборудования до летального исхода.

Анализ статистических данных, приведенных на рисунках показывает, что проблема обеспечения безопасности на колчеданных рудниках по фактору взрывчатости сульфидной пыли и получила новое развитие.

Согласно «Инструкции по предупреждению взрывов сульфидной пыли ...» [54], нижний взрывоопасный предел содержания серы в руде равен 35%. В связи с этим, повышенное внимание по фактору обеспечения пылевзрывобезопасности, ранее было сосредоточено на рудниках с критическим содержанием серы. Однако на сегодняшний день, как показывает практика ведения подземных горных работ, обозначена тенденция возникновения взрывов или вспышек сульфидной пыли при ведении буровзрывных работ на месторождениях с содержанием серы менее 35% (рис. 1.1-1.3).

Следует отметить, что разработанные в советское время технические, методические и практические решения по обеспечению безопасности горных работ не могли учитывать современное изменение минерально-сырьевой базы страны, возможностей современного горно-добывающего оборудования и не адаптированы к новым условиям.

Так, согласно данным, приведенным рисунке 1.1 в период с 2010 года по 2014 год на ОАО «Гайский ГОК» зафиксировано 47 взрывов сульфидной пыли, с содержанием серы от 25 до 40% с различной степенью разрушений.

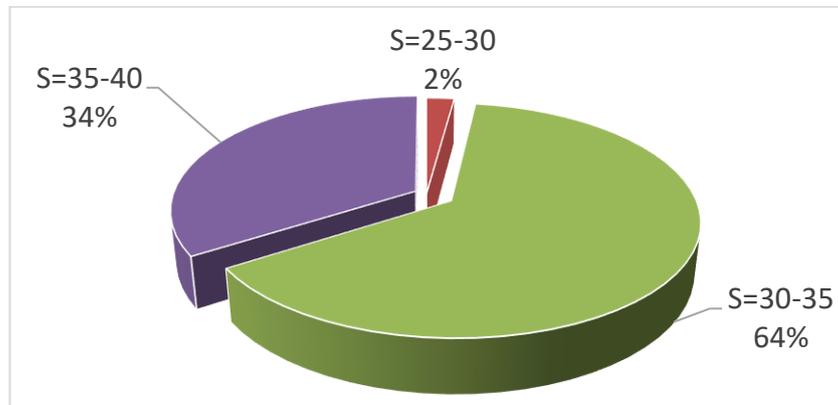


Рисунок 1.1 - Распределение взрывов сульфидной пыли в зависимости от содержания серы в руде на ОАО «Гайский ГОК» в период с 2010 по 2014 гг..

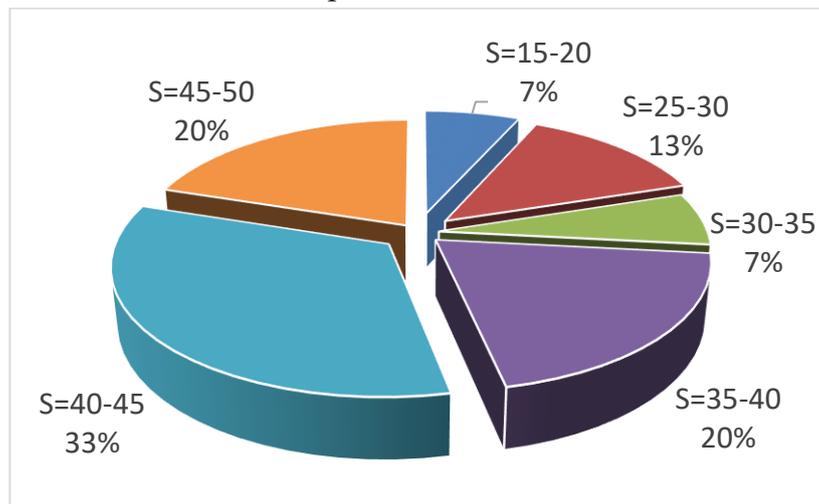


Рисунок 1.2 - Распределение взрывов сульфидной пыли в зависимости от содержания серы в руде на ОАО «Учалинский ГОК» в период с 2009 по 2014 гг..

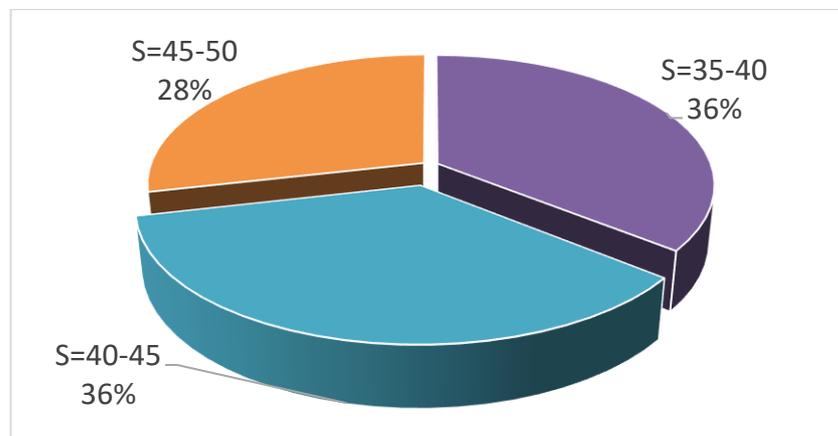


Рисунок 1.3 - Распределение взрывов сульфидной пыли в зависимости от содержания серы в руде на месторождении «Новый Сибай» в 2018 г.

Известна статистика по Учалинскому руднику (рис.1.2): за период с 2009 года по 2014 год: зафиксировано 15 взрывов сульфидной пыли в породах крепостью 10-12, с содержанием серы 15-50%. Отмечено, что взрывы наблюдались при ведении работ по медно-магнетитовым рудам, медно-пирротитовым, медно-колчеданным и при ведении работ по серному колчедану. При этом необходимо отметить, что во всех случаях принимались меры для предотвращения взрывов пыли, включающие орошение призабойной части выработки, установку туманообразователя и применение гидрозабойки.

Анализ отработки месторождения «Новый Сибай» за 2018 год (рис. 1.3) также свидетельствует о стабильной динамике возникновения аварийных ситуаций по фактору взрыва сульфидной пыли. Взрывы фиксируют при содержании серы в руде от 35-50 %, что свидетельствует о недостаточном проведении противовзрывных мероприятий.

В общей сложности, в период с 2009 по 2018 годы на предприятиях ООО «УГМК-Холдинг», известна статистика о возникновении 75 взрывов сульфидной пыли. При чем из них 63 произошли при взрывании скважинных зарядов, 12 – при взрывании шпуров.

Однако, в том числе, отсутствие законодательной нормативной документации по борьбе со взрывами сульфидной пыли, появление инновационных технологий ведения преимущественно буровзрывных работ привело к тому, что условия возникновения данных аварий на рудниках России возобновилось. Так воспламенение сульфидной пыли произошло весной 2017 г. на подземном руднике Сибайского филиала «Учалинского ГОКа» приведшее к групповому летальному исходу. Анализ причин при расследовании этой аварии показал, что источником возгорания сульфидной пыли (с последующим распространением пламени по выработке) послужила электрическая дуга, возникшая при нарушении силового кабеля в горной выработке. Причиной возгорания сульфидной пыли послужили нарушения требований электробезопасности, безопасности ведения горных и взрывных работ, допущенные техническим персоналом рудника и пострадавшими. Однако научный интерес, для предотвращения подобных аварий, состоит в том, что место возникновения дуги не соприкасается с зоной ведения взрывных работ.

Учитывая результаты расследования группового несчастного случая, Ростехнадзор установил, что действующие нормативные документы в области промышленной безопасности для объектов горнодобывающей промышленности

устарели и не содержат конкретных требований и указаний по ведению подземных горных работ на месторождениях опасных по взрывам и возгораниям сульфидной серосодержащей пыли, содержащейся в массивах добываемых руд и горных пород [80, 109].

На горных предприятиях, разрабатывающих месторождения колчеданных руд, одним из основных факторов опасности является взрыв сульфидной пыли. Причиной всех зарегистрированных взрывов колчеданной пыли являются взрывные работы, причем взрывы пыли наблюдаются при использовании всех типов ВВ, применяемых на колчеданных рудниках».

Анализ материала [46, 54, 89, 92, 146] по взрывам сульфидной пыли рудниках позволил сделать следующие выводы:

- число взрывов сульфидной пыли с нанесением ущерба различной степени тяжести здоровью работающего персонала достаточно велико;
- ежегодное число взрывов, взятое за последнюю четверть века близко к постоянному;
- тяжесть последствий взрывов остается практически стабильной.

По результатам анализа статистических данных [8, 46, 54, 78, 92, 113] о взрывах сульфидной пыли на колчеданных, антимонитовых и полиметаллических рудниках России, СНГ и Австралии установлено:

- с увеличением глубины разработки значительно растет содержание серы в отработываемых рудах;
- возрастает число рудников, разрабатывающих рудные тела, опасные по взрыву сульфидной пыли;
- применение более прогрессивных систем разработки и современных геотехнологий очистных и горнопроходческих работ связано с необходимостью значительного увеличения скорости проведения подготовительных выработок и увеличения объема буровзрывных работ, в том числе с применением скважин большего диаметра, вследствие чего возрастает потенциальная опасность взрывов сульфидной пыли.

В США и Канаде [1, 89, 145], взрывы сульфидной пыли в середине 20-х годов являлись достаточно частыми событиями. Так, взрыв на руднике «Unitedverde», возникший при проходке восстающего по серному колчедану, послужил причиной

организации масштабных исследований взрывчатости колчеданной пыли. На участке взрыва были отобраны пробы для испытания на взрывчатость, организованные в опытной штольне (Питсбургская галерея). Именно тогда было установлено, что колчеданная пыль с высоким содержанием серы является взрывоопасной.

Особого внимания заслуживает методическое руководство Департамента промышленности и ресурсов Австралии, 1997 г. [8], выпущенное для оказания помощи в выявлении источников опасности, а также разработки соответствующих мер и планов по подготовке кадров в области управления безопасностью горных работ в присутствии горючей сульфидной пыли при подземных горных работах. В основу данного руководства положены многолетний опыт ведения горных работ, результаты испытаний, сотрудничества надзорных органов и горных предприятий. Помимо конкретных рекомендаций, в руководстве установлены закономерности воспламенения сульфидной пыли, обобщены условия, которые могут привести к взрыву сульфидной пыли, а также определены факторы возникновения взрыва сульфидной пыли.

Так как проявления взрывов сульфидной пыли имеют место на медноколчеданных месторождениях с самого начала их разработки подземным способом в работе выполнен ретроспективный анализ нормативно-правовой документации в области промышленной безопасности (табл. 1.1).

В таблице 1.1 рассмотрены Инструкции по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, принятые в отечественной практике в 1963 [28], 1983 [53] и 1991 [54] годах, а также руководство департамента промышленности и ресурсов Австралии, принятое в 1997 году [8].

Характерной особенностью рассмотренных отечественных документов является консервативная неизменность ряда ключевых параметров. Так, например, нижний взрывоопасный предел содержания серы в руде составляет 30-35 %, в то время как в Австралии потенциально опасными считаются колчеданные руды с содержанием серы более 18%. При этом согласно установленного в ходе работы распределения взрывов сульфидной пыли в зависимости от содержания серы в руде, которое было приведено на предыдущем слайде, проявления взрывов наблюдаются в рудах с содержанием серы от 15 до 20 % для условий Учалинского месторождения и с содержанием серы от 25 до 30 % для условий Гайского. Отличие нормативного значения от фактически зафиксированного достигает 2,3 раз. Также внимания заслуживает отличие значений

температуры вспышки, принятых в отечественной и зарубежной практике, которое достигает 2,5 раз.

Таблица 1.1 - Анализ нормативно-правовой документации в области промышленной безопасности по фактору взрыва сульфидной пыли

Параметры	Временная инструкция по борьбе со взрывами сульфидной пыли колчеданных рудниках	Инструкция по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритосодержащие колчеданные руды			Guideline safety management of underground combustible sulphide dust, Australia
		1963	1983	1991	
Минимальная взрывоопасная концентрация СП в воздухе, г/м ³	80-100	80	80	200	
Нижний взрывоопасный предел содержания S в руде, %	30-35	35	35	18	
Температура вспышки СП, °C	≥ 500-600	-	≥ 800	320-365	
Распространение пламени по выработке	10-20 м при мелкошпуровой отбойке; 100 м при взрывании скважин	25 м при шпуровой отбойке; 100 м при взрывании скважин	25 м при шпуровой отбойке; 100 м при взрывании скважин	-	
Размер частиц, участвующих во взрыве, мкм	≤ 300	≤ 300	≤ 300	≤ 180	
Орошение призабойной зоны при взрывании шпуров, м	15	10	10	20	
Орошение призабойной зоны при взрывании скважин, м	20	30	30	20	
Разделение выработок по степени опасности	нет	да	да	нет	
Min концентрация O ₂ , необходимая для взрыва	-	-	-	13%	

Помимо этого, на протяжении более 50 лет в отечественной нормативной документации не менялся взгляд на размер частиц, участвующих во взрыве, который

составляет 300 мкм и менее. В то время как австралийские коллеги считают необходимым уделять внимание частицам размером не более 180 мкм.

При этом основным мероприятием, направленным на предотвращение взрывов сульфидной пыли, согласно рассмотренным нормативам, является орошение призабойной зоны, которое в настоящее время в отечественной практике должно выполняться на 30 м и в зарубежной на 20 м.

В документе [8] отмечено, что во всем мире за последние 20 лет наблюдается все большее число взрывов сульфидной пыли, которые совпадают с нарастанием использования взрывных работ со скважинами увеличенного диаметра. Стоит отметить, что в нашей стране с момента принятия нормативного документа [54], направленного на предотвращение взрывов сульфидной пыли, прошло 30 лет.

Первые исследования в области взрывов сульфидной пыли были проведены в 1934 г. в Урало-Казахской Промакадемии под руководством проф. В.М. Огиевского [88-89]. В ходе исследований изучался химический и дисперсный состав пыли, взятой из взрывоопасных забоев Калатинского и Белореченского рудников.

Изучение закономерностей взрывов пыли на Дегтярском руднике проводилось в 1959-1960 гг. институтом ЦНИГРИ. Целью исследования явилось создание водоустойчивых предохранительных взрывчатых веществ для шахт, опасных по взрывам сульфидной пыли. В результате была установлена зависимость минимальной температуры воспламенения пыли от дисперсности и влажности среды [46].

В 1961-1968 гг. в институте «Унипромедь» под руководством Э.И. Чернявского были проведены экспериментальные исследования взрывчатости колчеданной пыли на Уральских рудниках. Испытаниям подвергалась пыль пиритосодержащих руд. Наиболее взрывчатой оказались пыль пирита и марказита. Было установлено, что важным признаком, предопределяющим взрывоопасность колчеданной пыли, является высокое содержание в руде серы свыше 35%. Этот критерий и был положен в основу классификации руд по взрывоопасности [145-150].

В 1960-1980 гг. институтом «Унипромедь» и Свердловским горным институтом проводились исследования взрывов сульфидной пыли в пылевзрывной камере и на Уральских рудниках, разрабатывающих пиритосодержащие колчеданные руды. На основании проведенных исследований были разработаны «Временная инструкция по борьбе со взрывами сульфидной пыли на колчеданных рудниках», 1963 г. [28] и

«Инструкция по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритосодержащие колчеданные руды», обновленная в 1983 [53] году и в 1991 году [54].

В развитие теоретических основ обеспечения безопасности горных работ внесли труды академиков А.А. Баряха, Ю.Н. Малышева, Н.Н. Мельникова, К.Н. Трубецкого, член-корр. РАН, Д.Р. Каплунова, А.Е. Красмоштейна, профессоров И.И. Айнбиндера, А.Т. Айруни, М.А. Иофиса, В.В. Кудряшова, М.В. Рыльниковой и др.

Значительный вклад в развитие теории возникновения и практики обеспечения безопасности подземных горных работ по фактору взрыва сульфидной пыли был сделан отечественными учеными: академиками Н.Н. Семеновым, А.А. Скочинским, докторами и кандидатами наук А.С. Алешиним, Н.С. Бахаревичем, В.Н. Бекчиу, А.А. Васильевым, А.П. Годжелло, С.А. Гориновым, Л.В. Дубновым, А.А. Еременко, А.И. Ермолаевым, В.А. Захаровым, Я.Б. Зельдовичем, М.Х. Кожабаевым, В.Я. Манаковым, И.Ю. Масловым, Н.Г. Матвиенко, В.М. Огиевским, Г.П. Парамановым, А.В. Пинаевым, В.Н. Рыжковым, М.В. Рыльниковой, В.И. Смирновым, В.И. Филипповым, Э.И. Чернявским, И.В. Чернобаем, В.А. Ярциным и другими.

Из работ последних лет по изучению природы взрывов сульфидной пыли, и их предупреждению следует отметить большой вклад, внесенный сотрудниками Санкт-Петербургского государственного горного университета. В монографии профессора Г.П. Параманова [91-92] разработаны способы предотвращения взрыва сульфидной пыли и снижения выбросов сернистого газа при производстве взрывных работ на колчеданных рудниках, основанные на применении запирающего газодинамического устройства, специальных профилированных забоек и ВВ с ингибиторами. Разработаны теоретические модели образования взрывоопасных пылевых фракций, получены результаты экспериментальных исследований влияния забойки и предложенного состава ВВ на предотвращение взрыва сульфидной пыли, рекомендованы рациональные конструкции шпуровых и скважинных зарядов с использованием профилированной забойки.

1.2. Механизм и условия формирования взрывоопасного сульфидного облака

Многие твердые тела, негорючие в обычном состоянии, или, во всяком случае, не представляющие собой тел, легко воспламеняющихся, становятся взрывчатыми и легко воспламеняющимися в состоянии тонкой дисперсности. Причины этого: большая поверхность соприкосновения превращенного в пыль тела с кислородом, в результате чего происходит интенсивное окисление с выделением тепла; поглощение пылинками кислорода; выделение пылью некоторых веществ при нагревании горючих газов [46].

Согласно тепловой теории горения [116], причиной самовоспламенения газовых систем являются активные центры медленно протекающих реакций с постепенным нарастанием температуры, объясняющимся тем, что выделяющееся при реакции окисления тепло не успевает отводиться в окружающую среду. Постепенное нарастание температуры ускоряет ход реакции, что, в свою очередь, создает условия для быстрого лавинообразного процесса.

В таблице 1.2 приведены наиболее распространенные минералы, при добыче которых возникает опасность возникновения взрыва пыли.

Таблица 1.2 - Содержание серы в типичных сульфидных минералах

Минерал	Химический состав	Сера, %
Пирит	FeS_2	53.3
Пирротин	Fe_{1-x}S	52-53.5
Халькопирит	CuFeS_2	34.9
Сфалерит	ZnS	32.9
Арсенопирит	FeAsS	19.6
Галенит	PbS	13.4
Пантландит	$(\text{FeNi})_9\text{S}_8$	32.7-33.8

При обработке колчеданных месторождений существует опасность возникновения взрыва облака сульфидной пыли. В горной промышленности предопределяющим фактором возникновения взрыва пыли или самовозгорания руды является минералогический состав, а именно содержание серы в таких рудах (таблица 1.2).

Облако тонкой пыли, нагретое в какой-либо точке до температуры воспламенения, быстро воспламеняется на всем своем протяжении. Происходит взрывообразное горение с нарастающей быстротой распространения пламени и возрастающим давлением. Это горение может превратиться в настоящий взрыв.

Главными источниками образования пыли в шахтных условиях являются: бурение, механическая подбойка (зарубка) и отбойка, взрывные работы, погрузка и выгрузка, транспорт полезного ископаемого и породы, сухие процессы сортирования и обогащения полезного ископаемого.

При добыче руды, общее количество взвешенной в воздухе пыли может быть распределено за счёт различных производственных процессов следующим образом [77]: за счет буровых работ — 80%; взрывных работ — 15%; за счет остальных работ — 5%. Таким образом, одним из главных источников образования пыли в рудниках можно считать бурение шпуров и скважин без применения каких-либо мер борьбы с образованием пыли. Количество получающейся при этом пыли зависит от физико-минералогического состава рудной массы и вмещающих пород (вязкости, хрупкости, твердости, влажности и др.), принятой системы разработок, метода бурения и направления шпуров и скважин, рода применяемых взрывчатых материалов и способов взрывания, способов набора и транспортировки полезного ископаемого и др.

Буровая пыль при выходе из шпура некоторое время удерживается в воздухе, а затем более крупные частицы оседают на стенки и почву выработки, формируя потенциальные источники возникновения взрыва. К тому же эта пыль непосредственно не вызывает заболевания человека силикозом, но при наличии такой пыли в воздухе, она оседает в верхних дыхательных путях человека, что нарушает их нормальную жизнедеятельность.

Согласно «Инструкции по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритосодержащие колчеданные руды», 1991 г. [54], разработанной на основе многолетних исследований, выполненных институтом «Унипромедь» [19, 105, 145-150] известно, что:

- сульфидная пыль, взвешенная в воздухе, способна образовывать взрывоопасные концентрации пылевзрывного облака и воспламеняться при воздействии на нее теплового источника с температурой, не менее 800°С;

- источником воспламенения сульфидной пыли в шахте являются высокотемпературные продукты детонации взрывчатых веществ (ВВ);

- основным фактором, характеризующим взрывоопасность сульфидных руд, является содержание в них пиритной серы. Нижний взрывоопасный предел содержания серы в руде находится на уровне 35%;

- наиболее взрывоопасными являются трудновзрываемые монолитные пиритосодержащие руды, имеющие коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протоdjяконова более 16, так как в этих рудах наблюдается явление «прострела» шпуров (скважин);

- взрывоопасность взвешенной сульфидной пыли зависит от ее химико-минералогического состава, концентрации в воздухе, крупности частиц, влажности;

- минимальная взрывоопасная концентрация сульфидной пыли в воздухе составляет 80 г/м³;

- взрыв сульфидной пыли сопровождается выделением сернистого газа, распространением пламени по выработкам на расстояние до 25 м при шпуровой отбойке и при вторичном дроблении, на расстояние до 100 м при бурении и взрывании скважин, кратковременным повышением температуры воздуха в зоне взрыва пыли до 1000-1200°С;

- во взрыве принимают участие частицы пыли от 0.3 мм и ниже;

- наиболее сильные взрывы происходят в очистных блоках, отрабатываемых системой подэтажных штреков (ортов), особенно на последней стадии их отработки при наличии больших объемов пустот в камерах;

- более опасной является пыль, которая образуется в момент взрыва при дроблении массива. Осевшая на стенках выработки пыль также может переходить во взвешенное состояние под воздействием воздушной ударной волны, возникающей при взрыве заряда ВВ, и принимать участие в образовании пылевого сульфидного облака при взрывных работах (в этом процессе принимает участие как вновь образующаяся пыль, так и пыль, формируемая с поверхности выработки под воздействием воздушной ударной волны);

- осевшая пыль теряет способность переходить во взвешенное состояние при влажности ее более 5%.

Образующаяся при различных технологических процессах пыль скапливается на стенах и кровле горных выработок. Согласно исследованиям [139], под действием воздушной ударной волны, распространяющейся по горной выработке после взрыва заряда ВВ пыль, после прихода ударной воздушной волны, отбрасывается от поверхности выработки и смешивается с воздухом. Далее взвешенные в воздухе частицы пыли (горючего порошка) самовоспламеняются в отраженной ударной

воздушной волне и сгорают при наличии достаточного количества окислителя (если температура воздуха в отраженной волне будет превосходить температуру возгорания пыли). Самовоспламенение происходит за счет нагрева пыли горячим воздухом. Повышение температуры воздуха обуславливается его нагревом во фронте ударной воздушной волны [30].

В таблице 1.3 приведены значения температур воспламенения пылевоздушных аэрозолей для различных смесей характерных для колчеданных месторождений горных пород.

Таблица 1.3 - Температура воспламенения пылевоздушных смесей [92]

Смеси сульфидных минералов и инертной примеси	Минералогический состав	Температура воспламенения пылевоздушной смеси °К.
Пирит + Галенит	60% FeS ₂ +40% PbS	843
Пирит + Сера	75% FeS ₂ +25% S	633
Пирит + Сфалерит	30% FeS ₂ +70% ZnS	843
Пирротин + Сфалерит	60% Fe ₇ S ₈ +40% ZnS	833
Галенит + Сфалерит + Сера	50% PbS+20% ZnS+30% S	913
Пирит + Сфалерит + Галенит	45% FeS ₂ +30% ZnS+ +25% PbS	863
Пирит+Халькопирит + Борнит	60% FeS ₂ +20% CuFeS ₂ + +20% Cu ₅ FeS ₄	713
Пирит + Галенит + Сфалерит + Халькопирит + Борнит	20% FeS ₂ +20% PbS+20% ZnS+ +20% CuPbS ₂ + +20% Cu ₅ PbS ₄	853

Авторами [30] выявлена зависимость температуры воздуха в отраженной ударной волне от избыточного давления (скачок давления) во фронте ударной воздушной волны, распространяющейся по горной выработке после взрыва заряда ВВ (начальная температура воздуха в горной выработке принималась равной 293°К).

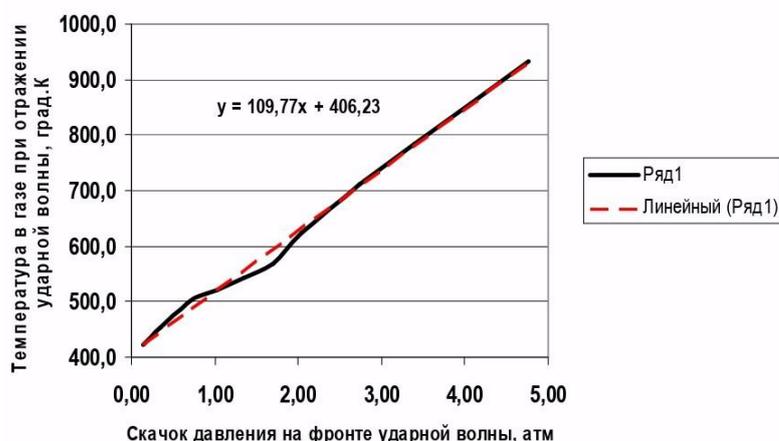


Рисунок 1.4 - Зависимость температуры воздуха в отраженной ударной волне от избыточного давления во фронте ударной воздушной волны [30]

Анализ данных таблицы 1.3 и зависимости температуры в воздухе в отраженной ударной волне, приведенной на рисунке 1.4, показывает, что при избыточном давлении

во фронте ударной волны более 4 атмосферы возможно самовозгорание сульфидной пыли, отложенной на стенках, кровле и др. твердых предметах, расположенных в горной выработке.

Таким образом, становится очевидно, что если данное самовозгорание произойдет вблизи кабелей или трубопроводов, проложенных вдоль горных выработок, то вероятно распространение в выработке волны горения сульфидной пыли как раз по поверхности кабелей и трубопроводов, на которых отложилась пыль.

На основании этого целесообразно произвести расчёт размеров зоны опасной по возгоранию сульфидной пыли под действием УВВ.

Ранее проведенные научно-исследовательские работы по изучению взрывов сульфидной на подземных рудниках были направлены на исследование объемного взрыва сульфидной пыли источниками термического воздействия. Не была учтена и не рассматривалась опасность слоевого горения сульфидной пыли [43].

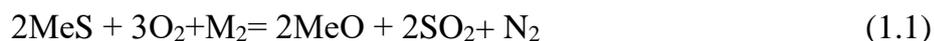
Выполненные институтом «Унипромедь» исследовательские работы [19, 106, 145-150] по обеспечению условий предотвращения взрывов сульфидной пыли и выполнению мероприятий, обеспечивающих безопасность ведения работ, в целом решили вопрос по обеспечению, на тот период, безопасной отработки медноколчеданных месторождений Урала. В свое время советской научной школой охраны труда создан серьезный научно-методический задел для предотвращения взрывов сульфидной пыли, в результате аварийность по факту взрыва сульфидной пыли была сведена к минимуму. Однако, разработанные ранее технические, методические и другие решения обеспечения безопасности труда не учитывали тенденцию истощения минерально-сырьевой базы России и экономических условий, что привело к наращиванию мощностей горнодобывающих предприятий, возможностей современного горного оборудования, средств взрывания и не могли быть адаптированы к новым современным условиям. Переход на технологию бурения, взрывания скважин большого диаметра, проходки выработок с применением комбайнов, секционного взрывания восстающих при проходке их методом VCR повлекли общее увеличение выделения пыли в атмосферу рудника с ростом доли тонкодисперсной пыли. При разработке месторождений сульфидных руд это обуславливает риск развития экзотермических процессов и взрывоопасность. В настоящее время взрывы пыли имеют место на колчеданных рудниках, даже при низком содержании серы в руде.

Все это подчеркивает актуальность рассмотрения проблем разработки профилактической борьбы со взрывами сульфидной пыли на колчеданных рудниках и указывает на необходимость проведения исследований по установлению основных особенностей и закономерностей возникновения и распространения взрывов сульфидной пыли при разработке месторождений колчеданных руд.

Для понимания механизма процесса воспламенения облака сульфидной пыли рассмотрим подробно механизм формирования с физико-химической точки зрения.

Важные исследования в области развития теории горения газовых систем принадлежат академику Н.Н. Семенову [115-116]. Тепловая и цепная теория воспламенения газовых смесей, разработанные Н.Н. Семеновым, послужили отправной точкой теоретических работ в области химической кинетики процесса горения различных элементов.

Основная реакция окисления сульфидов в общем виде может быть представлена уравнением:



По проф. В.И. Смирнову [118], эта реакция является экзотермической и гетерогенной. Согласно положениям макрокинетики [118, 49-51, 152], для подобных реакций существенные значения имеют как диффузия газовых реагентов в твердые частицы и газ, так и явление теплопередачи. Условия теплового возгорания сульфидов выявляются из соотношения генерации тепла и отдачи тепла в среду. Количество выделившегося тепла (генерация) в результате экзотермической реакции пропорционально скорости гетерогенного процесса окисления сульфидов, а количество отводимого тепла определяется условиями теплопередачи. Тепловой обмен между частицей и окружающей средой совершается через пограничный слой и определяется теплопроводностью.

Температура воспламенения сульфидов является такой температурой, при достижении которой окисление сульфида идет настолько интенсивно, что выделяющегося при этом тепла достаточно для самопроизвольного распространения процесса по всей массе материала без затрат постороннего топлива. Температура воспламенения сульфида не является неизменной величиной, а зависит от ряда факторов, как присущих самому сульфиду, так и обусловленных внешними причинами [49]. Из факторов, влияющих на процесс воспламенения сульфидов из физико-

химических свойств следует отметить теплоемкость, теплопроводность и плотность сульфида, а также тепловой эффект реакции его окисления.

Повышение интереса к проблеме случайных пылевых промышленных взрывов за последние годы вызвало интенсификацию исследований, направленных на оценку и снижение взрывоопасности. Это обусловлено изменениями минерально-сырьевой базы России и экономических условий, что привело к возрастанию объемов добычи бедного и труднообогатимого минерального сырья и наращиванию мощностей горнодобывающих предприятий. Причиной случайных промышленных взрывов, в частности неконтролируемых взрывов сульфидной пыли, является развитие экзотермической химической реакции [21]. Чтобы обеспечить пожаро- и взрывобезопасность таких технологических процессов, как бурение, зарядание и взрывание сульфидной пыли при отработке колчеданных месторождений целесообразно изучить характеристики процесса распространения взрывной волны и горения сульфидной пыли, как основу для рассмотрения механизма и критических условий взрыва сульфидной пыли в условиях подземной разработки месторождений колчеданных руд.

1.3. Меры и факторы безопасности горных работ при отработке колчеданных месторождений для предотвращения взрывов сульфидной пыли

Опасность возникновения и последствия взрывов колчеданной пыли вызвала необходимость разработки мероприятий по их предупреждению. Имеющийся опыт борьбы со взрывами угольной пыли лишь частично мог быть использован в условиях медно-колчеданных рудников, поскольку условия возникновения и характер взрывов колчеданной пыли в значительной степени отличают их от взрывов угольной пыли. В связи с этим, в нашей стране и за рубежом были проведены экспериментальные исследования, направленные на установление факторов, снижающих или повышающих риск возникновения взрыва облака пыли.

Для того чтобы воспламенение сульфидной пыли произошло, должны присутствовать в обязательной мере 3 компонента огненного треугольника: кислород, топливо и источник воспламенения (рис.1.5).

Предотвращение возгорания сульфидной пыли основано на контроле хотя бы одной стороны огненного треугольника. Результаты выполненных исследования [8] показали:

1. Кислород. Проведенные испытания по изолированию взрыва от внешнего источника кислорода (с содержанием кислорода выше 13%) не были успешными. Такой подход не позволяет контролировать огненный треугольник.

2. Топливо. Сульфидную пыль необходимо изолировать от других компонентов треугольника. Развитие воспламенения облака сульфидной пыли не является спонтанным, возгорание происходит постепенно и кумулятивно. Это означает, что отдельные частицы или скопления пыли для предотвращения взрыва должны быть окружены инертным материалом (т.е. изолирующим от кислорода или источника воспламенения). Регулярная уборка участка устраняет источник топлива. Особенно важным является уборка территории в радиусе 20 м от места взрыва. Также хорошей практикой является уборка любых возгораемых материалов в окрестности взрыва с высоким содержанием сульфидов.

3. Источник воспламенения. Сдерживание источников воспламенения является наиболее перспективным методом исключения взрыва сульфидного облака пыли. Исследование, проведенное доктором Р.Дж. Энрайтом, показало, что хорошая забойка взрывных шпуров удерживает пламя и препятствует возгоранию сульфидной пыли. Сложность состоит в поиске эффективного и практичного материала забойки способного удерживать пламя, образующееся в результате взрыва заряда в шпуре.



Рисунок 1.5 – Компоненты огненного треугольника

В настоящее время AMIRA проводит исследования в этой области. Испытания проводят с гелями и набухающей глиной, результаты испытаний позволили разработать рекомендации [8]:

- смывание скоплений пыли с бортов и кровли выработок водой перед использованием механизированного оборудования;
- исключение установления электрических моторов и выключателей в области образования сульфидной пыли (если они необходимы, то допускается только искробезопасное исполнение);
- оснащение транспортных средств оборудованием во взрывобезопасном исполнении и сведении риска пожара к минимуму;
- обслуживание механического оборудования должно обслуживаться по стандартам, исключающим чрезмерное трение.

Важным направлением в решении проблемы предупреждения взрывов пыли являлись экспериментальные исследования по изучению взрывоопасности колчеданной пыли. Значимые исследования по определению температуры воспламенения взвешенной сульфидной пыли проводились на установках, разработанных в Санкт-Петербургском горном университете. Дополнительно были получены данные о эффективности применения профилированной забойки, которая исключает взрыв сульфидной пыли, но за счет вынужденного выжигания серы увеличивается выброс сернистого газа. Для предотвращения данного отрицательного явления в состав ВВ добавляют наполнители-ингибиторы, наличие которых даже в отсутствии забойки приводит к снижению выброса сернистого газа [91].

Результатом вышеописанного эксперимента стал патент [95] на взрывчатое вещество для серных и колчеданных рудников, содержащее тротил, аммиачную селитру и ингибитор взрыва серной и сульфидной пыли – карбонат кальция. Такой состав ВВ исключает случаи взрыва серной и сульфидной пыли, снижает образование сернистого газа при взрыве. Содержание компонентов, мас. %: тротил 18-19, аммиачная селитра 68-72,5, карбонат кальция 8-14. Данный состав ВВ рекомендован к применению на колчеданных рудниках, опасных по взрывам сульфидной пыли, но не обязателен.

Одним из направлений в борьбе со взрывами сульфидной пыли является наличие забойки, как при шпуровом, так и при скважинном взрывании, основным назначением которой является подавление образующихся при взрыве ВВ ядовитых газов и пыли. В качестве забойки применяют гидропасту или водонаполненные ампулы. [54]. Гидрогель получают при взаимодействии жидкого стекла (Na_2SiO_3) с соляной кислотой (HCl). В результате многочисленных опытов был подобран состав гидрогеля, наиболее

отвечающий требованиям забоечного материала: жидкое стекло (плотность 1,54) - 9,5%, соляная кислота (концентрированная) – 3,5%, вода – 87,0%. Полученное вещество обладает ценными свойствами забоечного материала. К ним, прежде всего, относятся: большая теплоемкость, обусловленная значительным количеством воды; достаточная вязкость, обеспечивающая сохранение забойки в шпурах, пробуренных в любом направлении; не дефицитность и низкая стоимость; отсутствие в составе вредных и горючих примесей [144].

Допускается применение и глиняной забойки, но её длина должна быть не менее 0,5 м в забоях, отнесенных к I группе. В забоях II группы разрешается применять глиняную забойку, если отношение суммарного количества, одновременно взрываемого ВВ в кг к объему пустот в камере в м³ составляет не менее 2 [54].

Согласно Инструкции [54] эффективным способом борьбы со взрывами сульфидной пыли при взрывании шпуров считается орошение и смачивание водой поверхности выработки призабойной зоны перед началом ведения взрывных работ на протяжении 10 м от забоя. При взрывании скважин перед заряданием производится орошение водой поверхности выработок призабойной зоны на расстоянии не менее 30 м от крайних скважин до полного смачивания осевшей пыли.

Однако процесс осаждения сульфидной пыли, витающей в атмосфере подземного рудника при проведении различных технологических процессов, является динамическим, а интенсивность пылеотложения является одним из ключевых параметров, характеризующих состояние пылевой опасности.

Интенсивность пылеотложения определяет частоту орошения водой поверхности выработок призабойной зоны. Стоит отметить, что при разработке колчеданных месторождений, анализируемый параметр не конкретизирован. Особенно с учетом изменения темпов ведения горных работ и применения современного, горнотранспортного оборудования не всегда осуществляют своевременное орошение стенок выработки.

Образуемая при различных технологических процессах пыль скапливается на стенах и кровле горных выработок. Согласно исследованиям [30, 92, 145], под действием воздушной ударной волны, распространяющейся по горной выработке после взрыва заряда ВВ пыль, после прихода ударной воздушной волны, отбрасывается от поверхности выработки и смешивается с воздухом. Далее взвешенные в воздухе

частицы пыли (горючего порошка) самовоспламеняются в отраженной ударной воздушной волне и сгорают при наличии достаточного количества окислителя (если температура воздуха в отраженной волне будет превосходить температуру возгорания пыли). Самовоспламенение происходит за счет нагрева пыли горячим воздухом. Повышение температуры воздуха обуславливается его нагревом во фронте ударной воздушной волны.

Авторами [30] выявлена зависимость температуры воздуха в отраженной ударной волне от избыточного давления (скачок давления) во фронте ударной воздушной волны, распространяющейся по горной выработке после взрыва заряда ВВ (начальная температура воздуха в горной выработке принималась равной 293°K). Установлено, что при избыточном давлении во фронте ударной волны более 4 атм возможно возгорание сульфидной пыли, отложенной на стенках, кровле и других предметах, расположенных в горной выработке.

Таким образом, становится очевидно, что если данное самовозгорание произойдет вблизи кабелей или трубопроводов, проложенных вдоль горных выработок, то вероятно распространение в выработке волны горения сульфидной пыли как раз по поверхности кабелей и трубопроводов, на которых отложилась пыль.

Возникновение очага возгорания сульфидной пыли от воздействия ударной воздушной волны требует дополнительных комментариев и расчетов. Из этого следует, что зона распространения очага возгорания сульфидной пыли определяет протяженность орошения выработки от места зарядания и взрывания шпуров/скважин.

При этом основным мероприятием, направленным на предотвращение взрывов сульфидной пыли, согласно рассмотренным нормативам, является орошение призабойной зоны, которое в настоящее время в отечественной практике выполняется на расстоянии 10 м и 30 м при взрывании шпуров и скважин соответственно. Стоит отметить, что в нашей стране с момента принятия нормативного документа [54], направленного на предотвращение взрывов сульфидной пыли, прошло 30 лет. Рекомендации, приведенные в нем, не могут соответствовать современным процессам интенсификации горных работ.

Учитывая, основным способом борьбы со взрывами является орошение, то для предотвращения взрывов сульфидной пыли при определении протяженности орошения призабойного пространства должен быть учтен ряд параметров, претерпевших

технические и технологические изменения при ведении подземных горных работ. Эта мысль нашла свое отражение в работе [30], где коллективом автором представлено определение расстояния, при котором возможно возгорание колчеданной пыли под действием УВВ с учетом всех параметров, слагающих возникновение взрыва сульфидной пыли.

Для определения размеров зоны опасной по возгоранию колчеданной пыли, авторами [30] приведены основные физико-химические параметры: $M_{п.СКВ}$ – масса пыли, при взрыве зарядов, кг; $M_{п.ВЫР}$ – масса пыли на стенках опасного участка выработки, кг; $M_{ВВ}$ – масса взрываемого ВВ, кг; $d_{СКВ}$ – диаметр взрывной скважины, м; $\delta_{СКВ}$ – толщина слоя зоны измельчения вокруг скважины, м; ρ_M – плотность сульфидосодержащей породы, кг/м³; $\rho_{ВВ}$ – плотность заряжения ВВ, кг/м³; Σl – суммарная длина заряда, м; S – площадь сечения выработки, м²; L – длина опасного участка выработки, м; $k_{ПЫЛ}$ – коэффициент пыления, характеризующий долю мелкодисперсных частиц (до 300 мкм) в массе пород зоны измельчения; n – массовая доля ВВ, идущая на образование УВВ; $Q_{ВВ}$ – удельная теплота взрыва ВВ, Дж/кг; $Q_{АММ}$ – удельная теплота взрыва аммонита бЖВ, Дж/кг; q – удельная теплота горения сульфидной пыли, Дж/кг; X – расстояние от места ведения взрывных работ до рассматриваемого места, м; $k_{ГОР}$ – коэффициент полноты сгорания пылевых частиц; β – коэффициент шероховатости стенок выработки; $d_{ВЫР}$ – условный диаметр выработки ($d_{ВЫР} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$), м; ζ – общий коэффициент сопротивления движению УВВ на участке X ; ΔP – скачок давления на фронте УВВ, Па; I_1, I_2 – удельные импульсы УВВ от взрыва заряда ВВ, от взрыва сульфидной пыли, выбрасываемой в выработку при взрыве, соответственно, кг/(м*с).

Алгоритм расчета размеров зоны опасной по возгоранию сульфидной пыли [70] включает определение массы мелкодисперсных частиц пород ($M_{п.СКВ}$), выбрасываемых в пространство выработки при взрыве, а также определение расстояния, при котором возможно возгорание колчеданной пыли под действием УВВ.

Из источника [30] известно, что величина критического скачка давления во фронте УВВ, при котором возможно возгорание колчеданной пыли под действием УВВ, равна $\Delta P_{крит.} = 0,4$ МПа. Таким образом если при ведении взрывных работ произойдет

взрыв сульфидной пыли, то возможно возрастание давления Θ во фронте УВВ по сравнению только со взрывом ВВ равно:

$$\Theta = \sqrt{1 + \frac{I_2}{I_1}} \quad (1.2)$$

Согласно [43] имеем:

$$I = 2450 * \zeta^{-1} \frac{nM_{ВВ}}{S} * \frac{Q_{ВВ}}{Q_{АММ.}} \exp\left(-\frac{\beta X}{2d_{ВЫР.}}\right). \quad (1.3)$$

Полагая, что импульс УВВ при взрыве сульфидной пыли можно рассчитывать, как взрыв заряда ВВ соответствующей массы с поправками на удельное тепловыделение, имеем:

$$I_2 = 2450 * k_{пыл} k_{гор} \zeta^{-1} \left(\left(1 + \frac{2\delta_{СКВ}}{d}\right)^2 - 1 \right) \frac{\rho_M}{\rho_{ВВ}} M_{ВВ} \frac{q}{Q_{АММ.}} * S^{-1} \exp\left(-\frac{\beta X}{2d_{ВЫР.}}\right) \quad (1.4)$$

Таким образом, коэффициент усиления УВВ при взрыве сульфидной пыли во время проведения взрывных работ зависит от полноты и теплоты сгорания пыли, теплоты взрыва ВВ, плотности массива и плотности заряжения, диаметра скважин, хрупкости горных пород, массы заряда и условий его работы, сечения выработки, шероховатости поверхности выработки и удаления от места взрыва. Из (1.3), (1.4) следует:

$$\Theta = \sqrt{1 + k_{пыл} k_{гор} \left(\left(1 + \frac{2\delta_{СКВ}}{d}\right)^2 - 1 \right) \frac{\rho_M}{\rho_{ВВ}} \frac{q}{nQ_{ВВ}}} \quad (1.5)$$

Величина X находится из условия:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{крит}} = 1 \quad (1.6)$$

На основании (1.6), зависимости для определения ΔP , приведенной в [45, 46] и величины критического скачка давления на фронте УВВ получено уравнение для определения расстояния от места взрывных работ до рассматриваемого места – X :

$$\Theta \zeta^{-1} \frac{Q_{ВВ}}{Q_{АММ.}} \left(7,25 \frac{nM_{ВВ}}{SX} + 1,9 \sqrt{\frac{nM_{ВВ}}{SX}} \right) \exp\left(-\frac{\beta X}{d_{ВЫР.}}\right) = 1 \quad (1.7)$$

Поскольку не представляется возможным выразить X , то уравнение (1.7) решается методом последовательного приближения.

Таким образом протяженность выработки, подлежащей обработке (смыву, увлажнению, осланцеванию пыли), рассчитывают по вышеприведенным уравнениям из

условия превышения давления на фронте ударной воздушной волны более 4 атм. Методика расчета подтверждает необходимость уточнения безопасного соотношения по орошению водой поверхности выработки призабойной зоны и характера воздействия технологических процессов на массив сульфидных руд.

Также предложен способ борьбы со взрывами сульфидной пыли на колчеданных рудниках, основанный на инертизации забойной зоны газами, не поддерживающими горение [145]. Эффективность данного способа обеспечивалась в том случае, когда объем инертных газообразных продуктов детонации, превышал объем компенсационного пространства, не менее чем в два раза. Однако, применение данного способа в тупиковых забоях при шпуровом взрывании ВВ не представляется возможным в виду недостаточного количества выделяющегося инертного газа [142].

Одним из наиболее простых и надёжных средств создания защитной среды при производстве взрывных работ является высокократная воздушно-механическая пена. Однако, невозможность обеспечения стабильной дозировки пены, чувствительность к перепадам воды и изменениям проходящего воздуха, в совокупности с невозможностью контроля и дистанционного управления за расходом пенообразователя не позволили ввести данный метод в производство [142].

На данный момент, согласно «Инструкции по предупреждению взрывов сульфидной пыли ...» [54] на всех рудниках, опасных по взрывам сульфидной пыли является обязательным:

- наличие забойки, как при шпуровом, так и при скважинном взрывании, основным назначением которой является подавление образующихся при взрыве ВВ ядовитых газов и пыли (в качестве забойки применяют гидропасту или водонаполненные ампулы);

- введение ингибиторных частиц в состав ВВ (10-15% карбоната кальция в составе ВВ);

- мониторинг содержания пыли в рудничной атмосфере, что является чрезвычайно важным условием для контроля взрыво- и пожароопасности.

Применение описанных мероприятий позволяет предотвратить взрывы сульфидной пыли на колчеданных рудниках, улучшить санитарно-гигиенические условия, сократить время проветривания выработок и простой из-за аварий, обеспечить безопасность ведения горных работ. Но опыт добычи колчеданных руд показывает, что

применяемые в настоящее время способы предотвращения взрыва сульфидной пыли, либо технологически сложны в применении, либо малоэффективны, а использование их ограничивается проходческими забоями, а решение о выборе способа предотвращения взрыва сульфидной пыли требует комплексного подхода.

Изменение геологических, горнотехнических условий, усложнение геомеханической ситуации, повышение требований к эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых, к промышленной и экологической безопасности, возрастающие потребности в рудном сырье вызывают необходимость совершенствования нормативной базы, регламентирующей безопасное и эффективное освоение недр [111-113]. Таким образом, совершенствование нормативной базы целесообразно начать с рассмотрения и анализа методики оценки взрывобезопасных параметров.

1.4. Методика оценки взрывобезопасных параметров горных работ

Оценка безопасных параметров горных работ должна основываться, как на соблюдении действующих правил производства взрывных работ, в том числе описанных выше, так и на готовности персонала (шахты, предприятия) к чрезвычайным ситуациям.

В шахтах, склонных к взрывам сульфидной пыли, требуется дополнительная подготовка и средства для обеспечения готовности к чрезвычайным ситуациям:

- противопожарные камеры должны располагаться вблизи зон с сульфидным проявлением, а также являться легкодоступными. В противопожарных камерах должны находиться кислородные самоспасатели. Необходимо предусмотреть наличие кислородных баллонов, готовых к эксплуатации;

- персонал, работающий под землей, должен быть обучен использованию сопутствующему кислородному оборудованию, а также должны быть проведены обучение и практика по эвакуации из шахты;

- должны быть привиты навыки оказания первой помощи при эффектах, связанных с воздействием SO_2 и H_2S на человека;

- если во время обычных горных работ кто-либо под землей считает, что он почувствовал запах или вкус SO_2 или H_2S , то шахта должна быть эвакуирована, а атмосфера проверена.

Должное внимание необходимо уделять процессу возвращения персонала на рабочие места (в шахту). Здесь, основной проблемой после взрывных работ или непредвиденного воспламенения сульфидной пыли, является возможность столкновения с атмосферой, загрязненной токсичными газами (SO_2 и H_2S), или кислородным дефицитом.

Решение о возврате персонала на рабочие места, может быть принято после того, как: будет проведена оценка состава воздуха по шахте в целом и на конкретных рабочих местах; будет восстановлено нормальное направление движения воздушной струи; истечет время, достаточное для удаления всех отравляющих газов. Необходимо наличие письменной процедуры для возвращения на шахту, из которой был полностью эвакуирован рабочий персонал или же, где часть или все сотрудники заняли противопожарные камеры. Процедура должна учитывать прогноз состояния вентиляционной сети, полученный с помощью компьютерного моделирования, которое учитывает ожидаемые эффекты от воспламенения сульфидной пыли для системы вентиляции.

Плановая оценка состояния шахты после воспламенения сульфидной пыли или вероятного воспламенения должна включать следующее:

- визуальную оценку основного потока выходящих газов (взрыв образует более чем достаточное количество «пыли»);
- наблюдение за показаниями любого удаленного оборудования для обнаружения газов;
- разведывательная группа, в которой должно быть, по меньшей мере, два человека, должны быть оснащена и обучена использованию автономными дыхательными аппаратами, и оборудованием для обнаружения газов;
- разведывательная группа не должна входить в зоны не пригодные для дыхания (только в крайних случаях), ее цель состоит в том, чтобы установить участки с загрязненной атмосферой и участки, в которых может быть нарушена схема вентиляции;
- в состоянии ожидания должна находиться резервная спасательная команда, экипированная автономными дыхательными аппаратами;
- команда должна осуществлять записи о всех находках, и в случаях, когда возможно, – находиться на связи по радио напрямую с старшим по смене;
- окончательный допуск в шахту выдается руководителем или уполномоченным лицом, назначенным директором.

Согласно ГОСТ 12.1.010-76 [35] производственные процессы должны разрабатываться так, чтобы вероятность возникновения взрыва на любом взрывоопасном участке в течение года не превышала 10^{-6} . В случае технической или экономической нецелесообразности обеспечения указанной вероятности возникновения взрыва производственные процессы должны разрабатываться так, чтобы вероятность воздействия опасных факторов взрыва на людей в течение года не превышала 10^{-6} на человека. При этом принятое значение вероятности возникновения взрыва на любом взрывоопасном участке производственного процесса должно быть обоснованно и согласованно в установленном порядке с органами государственного надзора.

В связи с существующей вероятностью возгорания колчеданной пыли, отложенной на стенках, кровле и других твердых предметах, расположенных в горной выработке, авторами [30] приведена инженерная методика расчета безопасного расстояния по зажиганию колчеданной пыли ударно-воздушной волной (УВВ). Если данное возгорание произойдет вблизи кабелей или трубопроводов (аналогично аварии, произошедшей в 2017 году на Сибайском подземном руднике), проложенных вдоль горных выработок, то вероятно распространение в выработке волны горения колчеданной пыли. Представляется целесообразным приобщить определение размеров зоны опасной по возгоранию колчеданной пыли под действием УВВ, приобщить к методике оценки взрывобезопасных параметров горных работ, с дальнейшим закреплением в нормативно-правовой документации.

Конкретные требования взрывобезопасности при разработке месторождений колчеданных руд к отдельным производственным процессам должны быть установлены нормативно-технической документацией, включающей параметры и свойства взрывоопасной среды, а именно: температура вспышки, концентрационные и температурные пределы воспламенения, температура самовоспламенения, нормальная скорость распространения пламени, минимальное взрывоопасное содержание кислорода (окислителя), минимальная энергия зажигания, чувствительность к механическому воздействию (удар, трение). Также должны быть учтены основные факторы, характеризующие опасность взрыва: максимальное давление и температура взрыва, скорость нарастания давления при взрыве, давление во фронте ударной волны, дробящие и фугасные свойства взрывоопасной среды.

В производственных процессах с целью обеспечения взрывобезопасности следует контролировать: параметры взрывоопасности исходных веществ, технологический режим, состав атмосферы производственных помещений, технологическое оборудование, электрооборудование. Подлежащие контролю параметры взрывоопасности выбирают исходя из условий проведения производственного процесса. В том числе следует определить: нижний концентрационный предел воспламенения пылевоздушных смесей - по ГОСТ 12.1.044-89 [33].

Стандарты по взрывобезопасности должны содержать конкретные требования и включать в себя: характеристику взрывоопасности веществ, решения и средства по обеспечению взрывопредупреждения и взрывозащиты, предельно-допустимые взрывобезопасные концентрации веществ, средства и методы контроля с указанием типа применяемых приборов, необходимой точности измерений, периодичности контроля и т.д., организационные мероприятия по обеспечению взрывобезопасности.

Положительная оценка взрывобезопасных параметров при подземной разработке медноколчеданных месторождений может быть дана лишь в случае полного отсутствия воспламенения сульфидной пыли и, как следствие травматизма. Эффективность применяемых мероприятий напрямую зависит от того, насколько технические решения подкреплены теоретическими разработками, такими как математические модели и программы, позволяющие на основе численного моделирования связать характеристики зарядов с образованием сульфидной пыли в ближней зоне.

1.5. Цель, задачи и методы исследований

Условия эффективного развития минерально-сырьевой базы России с учетом изменения горно-геологических, горнотехнических и природно-экономических факторов освоения месторождений природного и техногенного минерального сырья объективно связаны с усилением роли исследований в области безопасности горных работ. На месторождениях колчеданных руд разработка научно-обоснованных требований к безопасности и надежности используемых средств предупреждения взрывов сульфидной пыли, выбор рациональных условий их применения, обеспечивающих требуемую безопасность, техническую реализацию и экономическую целесообразность на основе исследования горения и взрыва аэрозолей сульфидных руд, представляет собой важную в научном и практическом отношении задачу [109].

Приведенный обзор литературных источников и анализ практики разработки медноколчеданных рудников показывает, что проблема борьбы со взрывами пыли до настоящего времени полностью не решена.

В связи с этим для предотвращения взрывов сульфидной пыли в ИПКОН РАН в лаборатории Экологически сбалансированного освоения недр в рамках данной диссертационной работы проведены исследования, направленные на выявление факторов опасности, определяющих возникновение взрывов сульфидной пыли, уточнение механизма и условий возникновения взрыва, изыскание мер по предотвращению взрывов сульфидной пыли, а в случае их возникновения по локализации аварии, а также разработка способов снижения вероятности возникновения очага подобных взрывов.

На основании проведенного анализа, представленного в разделах 1.1-1.4. настоящей диссертации, сделаны следующие выводы:

1. Буровзрывные работы являются одним из основных технологических процессов проведения горных выработок и очистной выемки при добыче руды на колчеданных рудниках. Специфичность условий ведения буровзрывных работ на колчеданных рудниках обусловлена возможностью взрыва, образовавшейся в ходе буровых и взрывных работ сульфидной пыли. В связи с дальнейшим увеличением объема горных работ на рудниках возрастает число забоев, опасных по взрыву сульфидной пыли, что обуславливает более высокие требования к безопасности взрывных работ, а также в связи с появлением новых технологий бурения скважин, в первую очередь большого диаметра.

2. Основным фактором, влияющим на способность возникновения взрыва сульфидной пыли, является содержание в разрабатываемом горном массиве серы. Наибольшей взрывчатостью обладает аэрозоль колчеданных руд с содержанием серы свыше 40%, а при содержании серы менее 35%, пыль преимущественно не является взрывоопасной. Однако, при разработке месторождений колчеданных руд, содержащих 15 и более процентов серы, были также зафиксированы взрывы сульфидной пыли. Так, на Сибайском, Гайском и Учалинском рудниках, разрабатывающих колчеданные и руды с содержанием серы до 30%, неоднократно были зафиксированы взрывы сульфидной пыли. Неоднозначность определения условий взрыва сульфидной пыли при разработке

месторождений колчеданных руд предопределила необходимость проведения дополнительных исследований проявления этого фактора аварии.

3. Отсутствует единая нормативная методика оценки склонности взрывоопасности сульфидной пыли в силу широкого разнообразия горно-геологических и горнотехнических условий разработки рудных месторождений.

В соответствии с вышеизложенным, **целью работы** является изыскание технологических решений по снижению рисков взрывов сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд.

Достижение поставленной цели и реализация идеи обеспечены решением ряда **научно-практических задач:**

- проанализировать и обобщить опыт безопасного ведения горных работ по фактору взрыва сульфидной пыли при отработке месторождений колчеданных руд, обобщить нормативные документы по вопросам взрывобезопасности;
- разработать методику и выполнить исследования взрывчатых свойств сульфидной пыли;
- выявить неучтенные ранее факторы обеспечения безопасности ведения горных работ и разработать мероприятия по снижению риска возникновения взрывов сульфидной пыли;
- оценить вероятность возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывом сульфидной пыли и перспективы ее снижения при реализации компенсирующих мероприятий.

Методы исследований включали сбор, обобщение опыта ведения горных работ на предприятиях, опасных по взрывам сульфидной пыли, обзор и анализ результатов научных исследований отечественных и зарубежных ученых, практического опыта в области обеспечения безопасности по фактору взрыва сульфидной пыли, исследование факторов и процессов, влияющих на пылевзрывоопасность с использованием методов: оптической микроскопии, включающей оптико-петрографический и минераграфический анализы, рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), синхронный термический анализ (СТА) с последующим научным обобщением и статистической обработкой полученных результатов.

2. РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОЛЧЕДАНЫХ РУД

2.1. Уточнение понятий и определений, связанных с обеспечением взрывобезопасности при разработке колчеданных месторождений, показателей опасности взрывчатости сульфидной пыли

Повышение требований промышленной и экологической безопасности эксплуатации подземных рудников, разрабатывающих месторождения, опасные по взрывам и возгораниям сульфидной серосодержащей пыли, вызывает необходимость совершенствования нормативной базы, регламентирующей безопасное и эффективное освоение недр. Действующая в настоящее время нормативная документация [54] объективно устарела в связи с внедрением на горно-добывающих предприятиях инновационных геотехнологий, программных комплексов, компьютерных разработок и не может быть в полной мере использована в современных условиях. За последние десятилетия существенно изменилась горнотехническая и геомеханическая ситуация, появились новые возможности экспериментальных методов сбора и обработки исходных данных, обоснования рациональных параметров горнотехнических систем, и, методы оценки рисков стали более совершенными. При этом переход на технологию бурения, взрывания скважин большого диаметра, проходки выработок с применением комбайнов, секционного взрывания восстающих при проходке их методом VCR, внедрение мобильного транспорта, ставшего новым источником пыления в подземных горных выработках, повлекли общее увеличение выделения пыли в атмосферу рудника с ростом доли тонкодисперсной пыли. При разработке месторождений сульфидных руд это обуславливает риск развития экзотермических процессов и взрывоопасность. Современные изменения минерально-сырьевой базы России привели к вовлечению в эксплуатацию убогосульфидных руд, оценка взрывопожароопасности которых ранее не проводилась [109]. Сложившаяся ситуация требует принятия мер по изменению порядка планирования и развития горных работ на основе научно-технического и нормативно-методического обеспечений. Для решения данной проблемы необходимо развитие научно-методических основ пылевзрывобезопасности, которые, в свою очередь, являются базовыми для формирования нормативной документации.

Для этого проведено развитие научно-методических основ пылевзрывобезопасности, уточнение терминов и определений. Выделен ряд действующих нормативных терминов и определений, принятых согласно Федеральному закону № 116 от 21.07.1997 г. «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [138], Руководству по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» [105] и Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» от 21.11.2018 № 580 [137].

Существует ряд опасностей, которые снижают защищенность человека в производственной среде. Под опасностью понимают свойство человека и компонентов окружающей природной и техногенной среды причинять ущерб живой и неживой материи [87]. Опасности техносферы возникают при достижении ее внешними потоками вещества, энергии и/или информации значений, превышающих способность к их восприятию любым объектом защиты без нарушения своей функциональной целостности. В свою очередь, техносферные опасности представляют собой совокупность производственных, социальных и природных опасностей, разрушающих техносферу.

Во всех сферах и режимах на человека действуют позитивные и негативные силы. Часто последние называются негативными факторами. Способность человека противостоять негативным факторам и получила название «безопасность». То есть безопасность – это состояние деятельности, при котором с определенной вероятностью исключено проявление опасностей, или отсутствие чрезмерной опасности, либо свойство объекта, выраженное в его способности противостоять опасностям [87].

Применительно к разработке месторождений сульфидных руд для предотвращения возникновения аварийной ситуации по фактору взрыва сульфидной пыли, первоочередной задачей руководства горного предприятия должен быть анализ риска аварии, представляющий собой процесс идентификации опасностей и оценки риска на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды.

Как уже было сказано ранее, современные способы ведения горных работ по добыче колчеданных руд и проходке горных выработок сопровождаются интенсивным

пылеобразованием. В местах образования пыли (бурение шпуров, взрывные работы, работа комбайнов и врубных машин, погрузочные и перегрузочные операции) зачастую запыленность воздуха значительно превышает санитарные нормы и нижний предел взрывоопасной концентрации, что может стать причиной взрыва сульфидной пыли. Процесс анализа риска возникновения аварии должен проводиться регулярно и учитывать механизацию и переоснащение оборудования, изменение технологии ведения горных работ с учетом изменения содержания серы в массиве горных пород и рудничной атмосфере, вещественный состав присутствующей в ней пыли.

Под вещественным составом пыли понимают [31] совокупность содержания химических соединений минералов, петрографических разновидностей или химических соединений, входящих в состав пыли.

Наибольшую опасность для людей, находящихся в выработках, при разработке колчеданных руд, представляет взрыв сульфидной пыли – явление, возникающее в результате физико-химической реакции в форме вспышки или взрывного горения аэрозоля и сопровождающееся выделением большого количества энергии и сжатых газов. Высокотемпературная реакция возможна при взаимодействии источника горения (огонь, искра, высокая температура) с пылегазовой средой.

Поскольку первостепенным фактором, определяющим взрывоопасность сульфидной пыли, является содержание серы в рудах и породах месторождения, то зная содержание серы в руде и породе, представляется возможным провести корректную оценку риска аварии, т.е. оценку и определение вероятности, или частоты и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и окружающей природной среды.

Оценка риска возникновения взрыва облака сульфидной пыли при ведении очистных и проходческих работ должна учитывать ряд критериев: категорию опасности рудника, группу по интенсивности пылеотложения, увлажненность массива, износ электрооборудования, нарушение взрывозащиты электрооборудования, нарушение проветривания, необеспеченность расчетным количеством воздуха, отсутствие или неисправность аппаратуры аэрогазового контроля, нарушение пылевзрывобезопасности выработок, электрооборудования, нарушение пылегазового режима.

Адекватно оценивать риски всех видов и выбирать варианты их полной ликвидации или снижения степени их воздействия необходимо проводить посредством

работы с обстоятельствами, обуславливающими возникновение постоянно повторяющихся нарушений, то есть выявить опасные производственные ситуации в следующей последовательности:

1. определить наиболее опасные объекты, зоны и процессы – по количеству аварий, травм инцидентов;
2. выявить повторяющиеся нарушения требований промышленной безопасности;
3. выявить и распределить факторы, влияющие на возникновение аварии и их частоту;
4. разработать и внедрить типовой сценарий аварии по ликвидации обстоятельств, вызывающих нарушения на объекте;
5. установить контроль за реализацией мероприятий и при необходимости провести корректировку.

Как показывает многолетний опыт ведения горных работ, даже при возникновении аварий размер нанесенного ущерба варьируется в зависимости от практических навыков персонала и умения действовать в критических ситуациях. Готовность персонала и руководства рудника к нештатным ситуациям определяется знанием и моделированием различных сценариев аварии. Под сценарием аварии понимается [105] последовательность отдельных логически связанных поставочных событий, обусловленных конкретным иницирующим (исходным) событием, приводящим к возникновению поражающих факторов аварии и причинению ущерба от аварии людским и (или) материальным ресурсам или компонентам природной среды. Руководством по безопасности [105] регламентирован лишь типовой сценарий аварии – сценарий аварии после разрушения отдельного сооружения и (или) технического устройства, а также возникновения неконтролируемого взрыва и (или) выброса опасных веществ из единичного технологического оборудования (блока) с учетом регламентного срабатывания имеющихся систем противоаварийной защиты, локализации аварии и противоаварийных действий рабочих.

Отметим, что анализ ситуаций возникновения аварий по взрывам сульфидной пыли, который показывает, что от года к году их количество не уменьшается, позволяет сделать вывод, что часто аварии подобного рода происходят из-за того, что знакомый ответственным специалистам типовой сценарий аварии не работает, и аварийный

процесс идет по совершенно не предусмотренному, не предполагаемому плану, который мы можем именовать именно как нетиповой сценарий аварии.

Считаем необходимым дополнить термином – нетиповой сценарий аварии, который предполагает развитие сценария аварии после разрушения отдельного сооружения и (или) технического устройства, а также возникновения неконтролируемого взрыва и (или) выброса опасных веществ из единичного технологического оборудования (блока) с учетом нерегламентного срабатывания имеющихся систем противоаварийной защиты, локализации аварии и противоаварийных действий рабочих.

Под компенсирующими мероприятиями понимают [50] дополнительные меры безопасности, обеспечивающие безопасное ведение горных работ на опасном производственном объекте, допускающие отступления от требований федеральных норм и правил в области промышленной безопасности. В развитии терминологии возможно добавление термина стабилизирующее мероприятие - комплекс мер безопасности, обеспечивающих безопасное ведение горных работ на опасном производственном объекте в течение значительного временного отрезка (например, от 6 месяцев и более), и указывающие на практически полную нормализацию опасного явления.

В результате системного подхода к анализу возможных опасных ситуаций, оценки видов риска при ведении работ на опасном производственном объекте, а также реализации мероприятий, направленных на устранение и профилактику возникновения аварийной ситуации, принимается решение о уровне приемлемого риска. Понятие приемлемый риск неотъемлемо при ведении подземных горных работ, поскольку данный вид деятельности относится к объекту повышенной опасности. Таким образом, приемлемый риск – это значение риска, уровень которого допустим и обоснован исходя из технических и социально-экономических показателей. Однако данный критерий оценки справедливо дополнить понятием неприемлемый риск – значение риска, уровень которого находится на пограничной отметке приемлемого риска и зоны аварии, и является недопустимой позицией, обоснованной исходя из технических и социально-экономических показателей. Оценка факторов риска должна проводиться на руднике регулярно силами внутреннего персонала и привлеченных экспертов. В случае оценки

риска как неприемлемого, целесообразно выполнение компенсирующих мероприятий в зависимости от фактора опасности.

Таким образом перечень ключевых понятий и определений, связанных с обеспечением взрывобезопасности при разработке месторождений колчеданных руд в рамках развития научно-методических основ, целесообразно дополнить терминами: «нетиповой сценарий аварии», «стабилизирующие мероприятия» и «неприемлемый риск». Для снижения риска возникновения взрывов сульфидной пыли необходимо проводить оценку вероятности возникновения и развития аварийных ситуаций с проработкой нетиповых сценариев аварии на базе рискориентированного подхода. Так, если в случае реализации сценария уровень риска будет неприемлем, необходимо проведение стабилизирующих мероприятий. Преимуществом данного подхода является заблаговременное выявление и предупреждение риска возникновения взрыва сульфидной пыли.

2.2. Совершенствование методов определения взрывчатости сульфидной пыли

Рост механизации и интенсификации горных работ в рудной промышленности приводит к большому образованию и накоплению пыли, что увеличивает риск возникновения взрывоопасного облака сульфидной пыли. Образование пыли, ее накопление, и, как следствие, возможный взрыв приводят к возникновению аварийной ситуации, которая является одной из причин нарушения функционирования шахты.

Очевидно, что на сегодняшний день индустрия обеспечения безопасности для горнодобывающих предприятий должна стремиться к внедрению и использованию современных способов и средств анализа и защиты, соответствующих мировому уровню. В свое время советская научная школа охраны труда создала серьезный научно-методический задел для изучения и предотвращения взрывов сульфидной пыли. В результате, этого аварии по факту взрыва сульфидной пыли долгое время на отечественных рудниках не происходили. Однако, разработанные в советское время технические, методические и другие решения обеспечения безопасности труда не могли учесть возможностей современного добычного оборудования и не были адаптированы к новым условиям ведения горных работ.

Мероприятиям по предотвращению и локализации взрывоопасного облака сульфидной пыли предшествует процесс изучения сульфидной пыли. Для максимально

эффективного результата, в первую очередь, необходимо проанализировать и усовершенствовать лабораторный и научно-методический подход к изучению взрывчатости сульфидной пыли.

Методика проведения исследований по оценке возникновения и факторов взрываемости сульфидной пыли в условиях разработки месторождений колчеданных руд включает комплексную оценку минерального состава руд и вмещающих пород, определение гранулометрического и вещественного состава пылевого облака, изучение взаимодействия сульфидной пыли с применяемыми видами ВВ, оценку влияния технологических факторов, процессов бурения на формирование сульфидной пыли. Система мониторинга является неотъемлемой составной частью системы промышленной безопасности на горном предприятии, обеспечивает возможность анализа и оценки состояния потенциальных источников опасности, оперативного выявления результатов воздействия различных внешних факторов.

Для эффективного решения данного вопроса могут быть рекомендованы следующие этапы развития научно методических основ пылевзрывобезопасности [111]:

- совершенствование методов определения взрывчатости сульфидной пыли и определение нормативной частоты контрольных замеров непосредственно в подземном выработанном пространстве;

- использование современных приборов и методов, например, установка систем контроля за содержанием концентрации сульфидной пыли, определяющей взрывоопасные концентрации в атмосфере рудника и обеспечивающей получение объективной картины распределения опасных примесей по сечению выработок;

- повышение квалификации специалистов предприятия, в частности, подготовка специалистов по данному профилю, начиная со «студенческой скамьи»;

- открытость и сотрудничество: создание единой базы данных по действующим предприятиям, входящим в зону риска в области взрывоопасности сульфидной пыли, включающая их характеристику, статистику по произошедшим авариям, результаты расследований, экспертные заключения, рекомендации;

- проведение комплексной оценки факторов опасности взрыва сульфидной пыли, а именно:

- определение нижнего концентрационного предела взрываемости пылевого аэрозоля, образующегося из взвешенной и отложившейся пыли;

- исследование факторов и процессов, влияющих на взрыво- и пожароопасность, как руды, так и вмещающих пород;
- определение массы отложившейся пыли на единицу поверхности выработки и горношахтного оборудования;
- разработка способов и параметров профилактических мероприятий по предупреждению образования взрывчатых концентраций сульфидной пыли и аэрозоля из отложившейся пыли;
- разработка способов локализации взрыва сульфидной пыли в выработках;
- совершенствование системы безопасности с точки зрения надежности и управляемости как в рудничных, так и аварийных режимах в связи с борьбой со взрывами сульфидной пыли.

Дальнейшие исследования должны носить предметный характер для каждого рудника в отдельности, учитывая состав руды и вмещающих пород, горно-геологические условия, режим и темп работы предприятия, технологию ведения буровзрывных, проходческих и добычных работ, типы применяемых ВВ и др. Необходимо учесть всевозможные факторы, которые могут стать причиной возникновения аварии на конкретном предприятии, а также определить частоту проведения экспертиз по мере развития горных работ, усложнения горно-геологических условий, изменений качества минерального сырья, внедрения нового оборудования и технологии ведения работ.

Все это позволит снизить негативное воздействие сульфидной пыли на среду обитания экосистемы подземного предприятия, в частности, на социально-технические и экономические ресурсы, и тем самым будет способствовать устойчивому функционированию всей горнотехнической системы и экологически сбалансированному и безопасному освоению недр.

Очевидно, что причина взрывоопасности, которую несет с собой пыль, образуемая в процессе разрушения массива горных пород и происходящая при этом диспергация твердого вещества, не устранена. Все рассмотренные трагедии с вредоносными факторами объединяет то, что они были следствием перевода в аэрозольное состояние массы твердых частиц с последующим их воспламенением. Именно поэтому сейчас так важно, для повышения качества изучения взрывчатых

свойств сульфидной пыли, подробно рассмотреть используемые в настоящее время методы и дать им оценку.

Обоснованием необходимости совершенствования методов определения взрывчатости сульфидной пыли является необходимость выполнения требований «Правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [137]:

- п. 166 – организации, эксплуатирующие шахты по отработке месторождений колчеданных, антимонитовых и полиметаллических руд, должны иметь заключение научной организации, содержащее сведения об опасности взрыва (воспламенения) серной или сульфидной пыли. В тоже время эти правила не конкретизируют как именно должно быть выполнено заключение, согласно каким нормативным документам, перечень каких исследований должен быть проведен.

Сейчас в нашей стране нет единой установленной методики определения взрывчатости сульфидной пыли, включающей комплексную методику оценку параметров взрывоопасности сульфидной пыли. Безусловно существующая методика ГОСТ 12.1.044-89 [33] позволяет экспериментально определить ключевые показатели параметров взрыва пылевоздушных смесей: нижний концентрационный предел распространения пламени, максимальное давление взрыва, минимальное взрывоопасное содержание кислорода и минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора. Однако даже после проведения экспериментальной оценки взрывчатости сульфидной пыли методами [33] и при соблюдении всех правил безопасности в рудничных условиях при разработке месторождений колчеданных руд происходят вспышки и взрывы сульфидной пыли.

Поскольку взрывчатость медно-колчеданных руд напрямую зависит от содержания в них серы, то изучению основных параметров взрывчатости сульфидной пыли предшествует обязательный химический анализ горных пород на содержание серы в образцах для дальнейшего определения методики лабораторных исследований.

Химический анализ на серу должен проводиться в аккредитованной лаборатории. Известна действующая методика определения содержания серы по ГОСТ 14048.8-80 [36] и ГОСТ 15934.8-80 [37]. Однако данные методы трудоемки и требуют большого количества аппаратуры и реактивов. В частности, для ГОСТ 14048.8-80 [36] необходимы: печь электрическая муфельная, термометр термоэлектрический хромель-

аллюмелевый, кислота азотная, кислота соляная и разбавленная, натрий хлористый, натрий углекислый безводный, калий бромноватокислый, гидрокселиамина гидрохлорид, гидразина дигидрохлорид, барий хлористый, серебро азотнокислородное, метиловый оранжевый раствор.

Метод основан на осаждении сульфат ионов в виде сульфата бария после кислотного разложения концентрата в присутствии окислителя (бромата калия). Данный метод позволяет определить содержание серы в ограниченном диапазоне - 25-40%.

Для проведения исследований на содержание серы по ГОСТ 15934.8-80 [37] требуется аппарат Киппа и значительный набор реактивов и растворов. Данный метод основан на осаждении сульфат-ионов раствором хлористого бария после предварительного сплавления навески концентрата со смесью углекислого натрия и перекиси натрия или кислотного разложения анализируемой пробы. Данный стандарт устанавливает гравиметрический метод определения массовой доли общей серы и титриметрический метод определения массовой доли сульфидной серы в пределах 10-40%, что является ограниченным показателем.

В настоящее время имеются высокоточные и менее трудоемкие и ресурсозатратные методы, позволяющие определить содержание серы в любых диапазонах его изменения и за короткий промежуток времени, как в лабораторных условиях, так и в полевых, менее чем за 1 минуту. Так, например, в лаборатории ЭКОН ИПКОН РАН для определения содержания серы в руде и породе медно-колчеданных месторождений используется анализатор XRF, предназначенный для идентификации и химического анализа элементов, содержащихся в исследуемых образцах, - твердых, жидких и порошкообразных. Данный прибор комбинирует рентгенофлуоресцентный метод (XRF) с неразрушающим анализом и измеряет элементы от магния до урана. Для проведения исследований необходимо лишь подготовить материал проб, посредством измельчения и отбора фракции менее - 40 мкм. Применение данного прибора позволяет с высокой степенью точности определить содержание серы, необходимое для установления степени взрывоопасности пыли в выработке, а также сразу установить содержание попутных компонентов.

Применение современного оборудования, в частности рентгенофлуоресцентного анализатора, можно рекомендовать при определении содержания серы для представительных образцов руды и породы при освоении любых месторождений.

Преимущества очевидны: в неограниченном диапазоне определения процентного содержания вещества, в простоте, надежности, мобильности, также немаловажным фактором является исключение человеческого фактора. Для надежности эксперимента, рекомендуется трижды проводить опыт и принять усредненное значение. Однако, как показала, практика, при изучении одного и того же образца значения остаются постоянными.

Обзор известных методов позволил выделить следующий комплекс лабораторных методов, позволяющих определить основные показатели взрывчатости сульфидной пыли. Перспективным является определение показателей пылевых взрывов при помощи 20-ти литровой сферы Сивека. Схема установки приведена на рисунке 2.1.

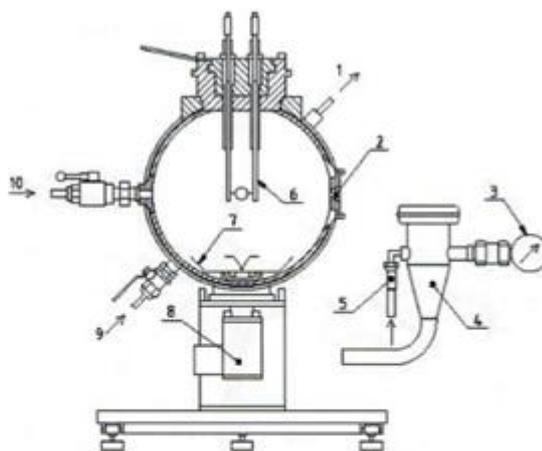


Рисунок 2.1 - Схема установки сферической камеры: 1 – выход воды; 2 – датчик давления; 3 – манометр; 4 – пылеотборник объемом 0,6 дм³; 5 – воздухозаборник; 6 – источник воспламенения; 7 – рикошетное сопло; 8 – быстродействующий клапан; 9 – водозаборник; 10 – выходное отверстие воздуха и продуктов реакции.

Для эффективной профилактики пылевых взрывов с помощью превентивной взрывозащиты необходимо знать оптимальные показатели взрыва, которые описывают взрывное поведение горючей пыли и могут быть определены комплексно в соответствии со стандартными требованиями Международных норм в 20-ти литровом лабораторном аппарате с установлением нижней границы взрывчатости облака пыли, минимальной энергии воспламенения облака пыли (W_{\min}), максимального давления взрыва (P_{\max}), скорости нарастания давления (dP/dt), предельной концентрации кислорода.

Нижняя граница взрывчатости облака пыли устанавливается по наименьшей концентрации горючей пыли в пылевоздушной смеси, при которой возможно при

комнатной температуре и атмосферном давлении распространение пламени, подтвержденное определенным ростом давления, отмеченным исследовательским оборудованием. То есть, установить нижнюю границу взрывчатости означает определить наименьшую концентрацию в камере, в пересчете на 1 м³, при которой не происходит взрыв. Процедура замера заключается в создании проб взрыва при уменьшающихся концентрациях пыли и установлении такой концентрации, при которой прирост давления будет равен нулю [59].

Основной частью устройства является сферическая камера сгорания, объемом 20 дм³, в которой можно осуществить смешивание испытываемой пыли с воздухом в заданной концентрации при известной турбулентности, а также воспламенить созданный аэрозоль через источник возгорания с различными показателями энергии.

Однако, данный метод может быть рекомендован к применению только в случаях, если информации о содержании серы, минимальной концентрации и температуры воспламенения недостаточно и принимаемые меры безопасности на предприятии не дают положительных результатов в области обеспечения пылевзрывобезопасности.

Как было отмечено ранее, сложность проблематики взрывобезопасности в запыленных производствах возрастает по мере наращивания производственных мощностей. За последние десятилетия выполнено большое количество экспериментальных и теоретических работ. Тем не менее, до сих пор не выявлены механизмы и не построена физико-математическая модель, учитывающая все факторы этого сложного процесса.

Поэтому для снижения вероятности возникновения взрыва сульфидной пыли, неотъемлемым методом обеспечения пылевзрывобезопасности на руднике является изучение совместимости руд и пород месторождения с применяемыми ВВ.

При отбойке медно-колчеданных руд преимущественно используют аммиачно-селитренные ВВ. Для определения совместимости состава ВВ с образцами руд и пород проводят исследования термической стойкости образца промышленного ВВ в контакте с представленными образцами руд.

Известны случаи самопроизвольных взрывов зарядов в скважинах, заряженных ВВ на основе аммиачной селитры при добыче сульфидных руд. Предполагаемой причиной таких самопроизвольных взрывов является химическое взаимодействие отдельных компонентов (в основном аммиачной селитры) с мелкодисперсной пылью

сульфидов и самородной серой в сильноокислой среде при наличии свободной меди. Накопление тепла в замкнутом объеме скважины вызывает самовоспламенение ВВ и его горение с последующей детонацией. Оценка совместимости медно-колчеданных руд также позволяет исключить вероятность возникновения саморазогрева сульфидной пыли при зарядании ВВ в массив горной породы [44].

Согласно Техническому регламенту таможенного союза ТР ТС 028/2012 125 «О безопасности взрывчатых веществ и изделий на их основе» п.2.3. [60] и в соответствии с Приложением 4 определен перечень показателей, необходимых для оценки безопасности взрывчатых веществ при их разработке: «...обязательно изучение совместимости с агрессивными средами для взрывчатых веществ, применяемых при разработке сульфидных месторождений».

Последовательность оценки условий взрывобезопасности следующая, предварительно с использованием электронного микроскопа исследуется элементный состав поверхности образцов руд и пород и их геолого-структурные особенности строения для выявления образца, минеральный состав которого может проявить термическую активность или повлияет на стойкость состава аммиачно-селитренного ВВ (АСВВ) при зарядании скважины или шпура.

Полученные данные представляются экспериментальными кривыми на графике и отражают процесс разложения эмульсионной матрицы в смеси с образцами пород, руд и воды. Экспериментальные результаты могут отражать снижение термической стойкости состава или ее отсутствие.

Термическую стойкость смесей определяют методом синхронного термического анализа – СТА. В состав методики входят три взаимосочетаемых и дополняющих друг друга метода, а именно метод термогравиметрического анализа (ТГ), метод дифференциально термического анализа (ДТА) и метод дифференциально сканирующей калориметрии (ДСК) [6, 103].

Термогравиметрический анализ – метод измерения массы вещества в ходе изменения его температуры по заданной программе. Дифференциальная сканирующая калориметрия – метод регистрации энергии, которая необходима для достижения исследуемым веществом температуры стандарта сравнения в идентичных условиях. Метод дифференциального термического анализа [6, 103-104] – метод исследования, заключающийся в нагревании или охлаждении образца с определённой скоростью и

записи временной зависимости разницы температур между исследуемым образцом и образцом сравнения – эталоном.

Данные методы позволяют комплексно оценить происходящие в веществе при его нагревании изменения, а именно скорость потери массы, величину эндо и экзотермических реакций и скорость протекания различных химических реакций, температуры и теплоту фазовых переходов; степень кристаллизации; стеклование; полиморфизм; наличие/отсутствие примесей; температурную стабильность; кинетику реакций окисления/восстановления, коррозию.

Данные ТГ можно использовать для контроля и оценки пожаровзрывоопасных свойств исследуемых образцов материала. Долговременная термическая стабильность - это комплексная функция условий эксплуатации и окружающей среды. Помимо прочего метод позволяет определить склонность образца к самовозгоранию критерием, которого для сульфидных руд является температурный интервал их окисления, температура начала воспламенения и условная скорость окисления.

Экспериментально получаемая кривая зависимости изменения массы от температуры, называемая термогравиметрической кривой или термограммой, позволяет судить о термостабильности и составе образца в начальном состоянии, о термостабильности и составе веществ, образующихся на промежуточных стадиях процесса и о составе остатка, если таковой имеется [4, 6].

Метод ТГА хорошо зарекомендовал себя при проведении экспертиз взрывобезопасности, в связи с тем, что позволяет получить подробное описание процесса каталитического разложения сульфидов.

Проведение данного лабораторного исследования обязательно для руд и пород с содержанием серы больше 35%, кроме того, он рекомендован для профилактики и комплексного обеспечения пылевзрывобезопасности при разработке месторождения с содержанием серы свыше 18%.

Таким образом, совершенствование методов определения взрывчатости сульфидной пыли способствует комплексному развитию научно-методических основ, связанному с обеспечением пылевзрывобезопасности при разработке месторождений колчеданных руд, что согласуется с задачей, решаемой в диссертации.

В свою очередь, для эффективной реализации комплекса мероприятий, приведенных в параграфе, в первую очередь, необходимо уточнить механизм формирования и распространения взрыва сульфидной пыли.

2.3. Обоснование механизма формирования и распространения взрывной волны в облаке сульфидной

Рассмотрение механизма и критических условий взрыва сульфидной пыли проведено для установления закономерностей и условий взрыва пылевого облака. Это, в свою очередь, является необходимым условием для разработки технологических рекомендаций по обеспечению безопасности горных работ по фактору взрывчатости сульфидной пыли. Следует отдельно отметить, что в рамках диссертационной работы рассмотрение условий взрыва облака сульфидной пыли выполнено с учетом изменений, произошедших в технологии ведения подземных горных работ за период со второй половины прошлого столетия, на которую приходится основной объем исследовательских работ в данном направлении, до настоящего времени. В частности, дополнительно изучены причины изменения характера образования пыли в рудничной атмосфере.

Сульфидная пыль состоит из мельчайших частиц сульфидов металлов: пирита, пирротина, халькопирита, сфалерита, молибдена, никеля, сурьмы, олова, свинца, мышьяка и других. Пыль этих минералов, образующаяся при бурении шпуров или скважин, при взрывных и выемочно-погрузочных работах, частично скапливается на стенках и в кровле горных выработок, а часть остается в атмосфере рудника во взвешенном состоянии. На полиметаллических рудниках, разрабатывающих многокомпонентные руды, в том числе медно-колчеданные месторождения, практически во всех странах, сульфидная пыль является причиной возникновения взрывоопасных ситуаций.

Известно [54, 92], что основными факторами, характеризующими взрывчатость сульфидной пыли, являются, температура воспламенения пылевоздушной смеси, период индукции окисления и давление продуктов взрыва. Процесс возникновения и распространения взрыва сульфидной пыли подробно рассмотрен в работах [60, 65, 122-123], в которых описана «эстафетная» схема алгоритма процесса взрыва сульфидной пыли в выработках. Авторы этих работ отмечают, что при ведении взрывных работ по

отбойке колчеданных руд возникает пылевое облако сульфидной пыли, взрывоопасной концентрации. Так, важным признаком, предопределяющим взрывоопасность сульфидной пыли, является высокое содержание в них серы, как правило, - свыше 35% [54]. Таким образом, наличие взрывоопасной концентрации пыли является основным необходимым условием возникновения, и распространения взрыва сульфидной пыли.

В работах [20, 47, 52, 119] более подробно рассматривается схема алгоритма протекания взрыва сульфидной пыли. В частности, авторы указывают на то, что имеет место воспламенение ближайшего слоя сульфидной пыли от газообразных продуктов взрыва, имеющих высокую температуру. Затем от воспламенённых частиц происходит передача взрывного импульса смежному слою не горящих частиц, далее следующему. Это, вероятно, составляет суть «эстафетной» схемы развития процесса, наиболее точно отражающей его суть. При этом, процесс воспламенения аэрозвеси сопровождается возникновением и развитием движения фронта пламени, в котором происходят основные химические образования, выделяющие большое количество тепла. Поэтому, именно при такой схеме развития процесса происходит достижение максимума температуры. Пульсационное перемещение фронта пламени связано с непрерывным воспламенением прилегающего слоя горючей смеси. Это и определяет устойчивое распространение взрыва, состоящее в последовательном воспламенении слоев аэрозвеси. При этом вблизи фронта пламени наблюдается закономерное увеличение температурного поля.

Необходимым условием распространения тепла от взрыва сульфидной пыли является неравенство температур в различных точках поля распространения взрывной волны. В рассматриваемом случае под полем распространения понимается выработанное пространство горной выработки. Исходя из этого, величина теплового потока, возникающего и распространяющегося в поле, вследствие теплопроводности, зависит от распределения температур и характера температурного поля. Таким образом, под температурным полем понимают совокупность в динамике мгновенных значений температур в рассматриваемом пространстве [142]. Тепловой поток из фронта пламени полностью поглощается в зажигаемом слое в случае его оптической непрозрачности. Поглощающая способность запыленных потоков A_n , характеризующая оптическую прозрачность слоя, определяется концентрацией, размерами и физическими свойствами самих частиц:

$$A_n = 1 - \exp(k), \quad (2.1)$$

где $k = K_{\text{сп}} F_{\text{сп}} N_{\text{сп}}$, $K_{\text{сп}}$ – интегральный коэффициент ослабления лучей частицами пыли, дол. ед.; $F_{\text{сп}}$ – средняя удельная поверхность частиц пыли, м²/г; $N_{\text{сп}}$ – концентрация сульфидной пыли в слое, г/м; L – эффективная длина луча, м.

При концентрации сульфидной пыли, близкой к стехиометрической, то есть такой концентрации смеси окислителя и горючего, в которой окислителя ровно столько, сколько необходимо для полного окисления горючего, что обеспечивает полное сгорание топлива без остатка избыточного окислителя в продуктах горения: $A_n = 0,65-0,8$, формируются условия оптической непрозрачности слоя. За счет тепломассообмена происходит нарастание температуры во вновь зажигаемом условно холодном слое от температуры окружающей среды до температуры воспламенения $T_{\text{в}}$ с последующим понижением температуры в слое горящих частиц. Протекание процесса в подготовительной области соответствует кинетическому режиму реакции, а время протекания процесса – периоду индукции. В момент, когда температура в зажигаемом слое достигает температуры воспламенения $T_{\text{в}}$ сульфида, происходит дальнейшее воспламенение сульфидной пыли. При этом протекание химических реакций интенсифицируется, а рост температуры носит адиабатический характер и повышается до температуры горения, сопровождаемой быстрым окислением сульфидов, с выделением значительного количества тепла, что позволяет поддерживать температуру процесса на необходимом уровне. Процесс окисления скачкообразно переходит из кинетического в диффузионный режим, при этом момент перехода характеризуется температурой воспламенения сульфида [29, 49, 52, 61, 65, 118].

В дополнение к вышесказанному авторы [92, 142] указывают на то, что необходимым условием развития взрыва сульфидной пыли является наличие достаточного количества тепла, передаваемого из зоны горения прилегающему слою пыли, для нагрева его до температуры воспламенения. Это условие может быть соблюдено при температуре в зажигаемом слое, большей или равной минимальной температуре воспламенения сульфида:

$$T_{\text{к}} \geq T_{\text{в}}, \quad (2.2)$$

где $T_{\text{к}}$ – конечная температура сульфидной аэровзвеси в зажигаемом слое, °К; $T_{\text{в}}$ – минимальная температура воспламенения сульфидной аэровзвеси, °К.

Из неравенства (2.2) вытекает критическое условие взрыва пылевоздушной смеси:

$$K_{\text{взр}} = \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{в}}} = 1, \quad (2.3)$$

где $K_{\text{взр}}$ – критерий взрывчатости пылевоздушной системы.

Иными словами, вторым необходимым условием возникновения и распространения взрыва сульфидной пыли является нагрев ее до температуры, не ниже температуры воспламенения сульфида.

Условие (2.3), по существу, отражает состояние экзотермического окисления сульфидной пыли, согласно которому, при $K_{\text{взр}} \geq 1$, возможен взрыв, а при $K_{\text{взр}} < 1$, пылевоздушная система не взрывается.

Количественная оценка критического условия взрывчатости сульфидной пыли дана в работе [94]. Автор указывает, что значение $T_{\text{к}}$ может быть найдено расчетным путем из общего уравнения теплового баланса взрыва, а минимальная температура воспламенения сульфидной пыли должна определяться экспериментально. Для этого рассмотрен процесс возникновения, и распространения взрыва сульфидной пыли в двухфазном аэродисперсном потоке.

Взаимодействие тепловых потоков в забое горной выработке при воспламенении облака пыли:

$$Q_{\text{выд}} = Q_{\text{зп}} + Q_{\text{хп}} + Q_{\text{воз}} + Q_{\text{ст}}, \quad (2.4)$$

где $Q_{\text{выд}}$ - общее количество тепла, выделившееся в зоне горения аэровзвеси, ккал; $Q_{\text{зп}}$ - количество тепла, поглощаемое зажженным слоем пыли, ккал; $Q_{\text{хп}}$ - количество тепла, поглощенное сульфидной пылью в холодном слое, ккал; $Q_{\text{воз}}$ - количество тепла, поглощаемое воздухом, ккал; $Q_{\text{ст}}$ - количество тепла, поглощаемое стенками выработки, ккал.

Количество тепла, отданного горящим слоем за время t рассматривается:

$$dQ_{\text{выд}} = \sum c_{\text{пв}} n_{\text{пв}} dt, \quad (2.5)$$

где $c_{\text{пв}}$ – теплоемкость продуктов взрыва, ккал/моль град.; $n_{\text{пв}}$ – концентрация продуктов взрыва, моль.

Часть тепловой энергии, выделяющейся во фронте пламени, передается зажигаемому слою сульфидной пыли за счет излучения и теплопроводности. В начальный момент, когда тепловой импульс, передаваемый теплопроводностью еще не достиг частицы сульфидного аэрозоля в зажигаемом слое, излучение является

единственным способом передачи тепла. К моменту подхода конвективного теплового импульса к холодному слою излучение уже передаст зажигаемой частице определенное количество энергии и, тем самым интервал времени между воспламенением смежных частиц, находящихся на одной нормали к фронту пламени в зажигаемом слое, сокращается [2, 52].

Количество тепла, поглощенное сульфидной пылью в зажигаемом оптически непрозрачном слое за время dt , согласно [5], определяется из выражения:

$$dQ_{\text{СП}} = \kappa \varepsilon_{\text{СП}} \varepsilon_{\text{ПЛ}} \sum F_{\text{СП}} \left[\left(\frac{T_{\text{ПЛ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{СП}}}{100} \right)^4 \right] dt + c_{\text{СП}} n_{\text{СП}} dt, \quad (2.6)$$

где κ - постоянная Больцмана; $\varepsilon_{\text{СП}}$ - эффективная степень черноты сульфидной пыли; $\varepsilon_{\text{ПЛ}}$ - эффективная степень черноты пламени; $\sum F_{\text{СП}}$ - суммарная площадь поверхности пылинок, ориентированных к фронту пламени, м^2 ; $T_{\text{ПЛ}}$ - температура пламени, $^{\circ}\text{К}$; $T_{\text{СП}}$ - температура сульфидной пыли в зажигаемом слое, $^{\circ}\text{К}$; $c_{\text{СП}}$ - теплоемкость сульфидной пыли, ккал/моль град .

Значение $\sum F_{\text{СП}}$ для частиц пыли, имеющих форму шара, определяется по формуле:

$$\sum F_{\text{СП}} = 1,5 \frac{n_{\text{СП}}}{d_{\text{СП}} \rho_{\text{СП}}}, \quad (2.7)$$

Согласно [63, 68] влиянием отражения тепла частицами сульфидной пыли в оптически непрозрачном зажигаемом слое можно пренебречь. Другая часть тепловой энергии, выделяющейся на фронте пламени, идет на нагрев воздуха в зажигаемом слое за счет теплопроводности, т.к. двухатомные газы O_2 и N_2 , составляющие его основу, являются практически прозрачными для теплового излучения. В течение времени тепловой релаксации аэрозоля, благодаря его нагреву, происходит изохорный, либо близкий к нему политропный термодинамический процесс с повышением давления, что определяет давление взрыва сульфидной пыли. Количество тепла, поглощаемое воздухом в зажигаемом слое, равно:

$$dQ_{\text{ВОЗ}} = c_{\text{ВОЗ}} n_{\text{ВОЗ}} dt, \quad (2.8)$$

где $c_{\text{ВОЗ}}$ - теплоемкость воздуха, ккал/моль град ; $n_{\text{ВОЗ}}$ - содержание O_2 и N_2 в зажигаемом слое, моль.

Кроме того, часть тепла, выделяющегося во фронте пламени, передается стенкам выработки излучением и конвекцией, при этом количество тепла определяется:

$$dQ_{\text{СТ}} = \kappa \varepsilon_{\text{СТ}} \varepsilon_{\text{ПЛ}} S_{\text{СТ}} \sum F_{\text{СП}} \left[\left(\frac{T_{\text{ПЛ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{СТ}}}{100} \right)^4 \right] dt + \alpha S_{\text{СТ}} (T_{\text{ПЛ}} - T_{\text{СТ}}) dt, \quad (2.9)$$

где $\varepsilon_{ст}$ - эффективная степень черноты стенок выработки; $S_{ст}$ - приведенная площадь стенок выработки, m^2 ; $T_{ст}$ - начальная температура стенок выработки, $^{\circ}K$; α - коэффициент теплоотдачи из фронта пламени стенкам выработки.

Таким образом, при рассмотрении механизма взрыва сульфидной пыли учтен факт распространения теплового потока из зоны горения в окружающую среду, посредством излучения, теплопроводности и конвекции. При этом определяющую роль играет процесс передачи тепла, в первую очередь, излучением.

Механизм воспламенения происходит следующим образом: тепловая энергия, выделяющаяся во фронте пламени, расходуется на нагрев смежного с ним слоя более холодных частиц пыли, а также стенок выработки и вмещающего газового объема. В этой связи, необходимо отметить, что для условия устойчивого взрывного горения в пылевоздушной смеси третьим необходимым условием является превышение выделившегося тепла в зоне горения над тепловыми потерями:

$$Q_{\text{выд}} > Q_{\text{пот}}, \quad (2.10)$$

где $Q_{\text{выд}}$ - тепло, выделившееся в результате сгорания сульфидной пыли, ккал; $Q_{\text{пот}}$ - тепловые потери на нагрев пылевоздушной среды и окружающего пространства, ккал.

Таким образом, проведенный анализ показал, что необходимыми и достаточными условиями для воспламенения сульфидной пыли в рудничной атмосфере являются:

1. Количество и плотность распределения сульфидной пыли в горной выработке должно быть достаточным, чтобы обеспечить требуемое для теплообмена сближение пылевых частиц.
2. Температура источника воспламенения должна быть близка к критической.
3. Тепловая мощность источника должна быть достаточной для воспламенения.

Опираясь на полученные результаты, рассмотрен потенциал технологических процессов горного производства в части формирования взрывоопасных кондиций в рудничной атмосфере. В этой связи внимания заслуживают процессы бурения и взрывания массива сульфидных пород, так как при этом пылеобразование происходит с наибольшей интенсивностью, в сравнении с прочими этапами воздействия на массив горных пород во всем цикле добычи руды. То, что процессы бурения и взрывания вносят определяющий вклад в создание взрывоопасной концентрации пыли и тем самым, определяют саму возможность возникновения и развития взрыва сульфидной

пыли широко известно и нашло отражение в «Инструкции по предупреждению взрывов сульфидной пыли ...» [54]. В данном документе декларированы обязательные требования по орошению водой поверхности выработок призабойной зоны на протяжении не менее 10 м от забоя перед заряданием и взрыванием шпуров. Перед заряданием скважин также должно производиться орошение водой поверхности выработок призабойной зоны на расстояние, не менее 30 м от крайних рядов скважин до полного смачивания осевшей пыли. Соблюдение приведенных рекомендаций является обязательным, с точки зрения предотвращения формирования условий, определяющих потенциальную возможность взрыва сульфидной пыли.

Представляется очевидным, что параметры орошения водой поверхностей выработок призабойной зоны перед заряданием и взрыванием шпуров и скважин определены, исходя из установленной ранее взаимосвязи между интенсивностью пылеобразования и технологией ведения взрывных и буровых работ, применяемой при подземной разработке месторождений сульфидных руд.

2.4. Разработка программы-методики проведенного исследования

Актуальность выполненных исследований подтверждается письмом Ростехнадзора № 00-07-06/844 от 22.05.17 г. «Об оценке взрывопожароопасности пород и руд, проектируемых и действующих объектов ведения подземных горных работ», для оценки взрывопожароопасности пыли горных пород и руд рудников, разрабатывающих месторождения сульфидных, колчеданных и иных серосодержащих руд, обладающих способностью к самовозгоранию, или на рудниках, пыль которых склонна к воспламенению от внешних термических воздействий.

В настоящее время на законодательном уровне отсутствует единая методика по определению взрывоопасности сульфидной пыли, формируемой в ходе подземных горных работ при разработке медно-цинковых, свинцово-цинковых, полиметаллических и других месторождений сульфидных руд.

В рамках развития безопасного и экологически сбалансированного освоения недр, разработана комплексная программа-методика определения взрывоопасности сульфидной пыли при освоении месторождений колчеданных руд в соответствии с которой на базе лаборатории Экологически сбалансированного комплексного освоения

недр (ЭКОН ИПКОН РАН) проведены исследования с целью изучения физико-химических свойств руд и исследования критериев взрывоопасности сульфидной пыли.

Для проведения лабораторных экспериментов использовались убогосульфидные руды и породы с содержанием серы ниже 35% месторождений Шануч и Сентачан, а также руды и породы с повышенным содержанием серы – 35 и более % Сибайского месторождения.

Необходимость совершенствования методов определения взрывчатости сульфидной пыли обусловлено интенсификацией горных работ, что приводит к значительному загрязнению среды обитания человека, увеличению контакта с загрязняющими веществами природных экосистем: атмосферы гидросферы и литосферы, а также техническим переоснащением рудников, что влечет изменение структуры пыли. В связи с этим особую значимость приобретает контроль объектов окружающей среды и, в первую очередь, состояние воздушной атмосферы на поверхности и в самих горнотехнических системах. В решении этой проблемы важную роль играет, прежде всего, оценка вида и концентрации рудничной пыли, присутствующей в атмосфере подземного рудника. Необходимо отметить, что сульфидная пыль взрывоопасна, что является ключевым фактором в выборе параметров безопасного ведения горных работ.

Принимая во внимание факт, что проблема пылеобразования с изучением условий формирования и свойств рудничной атмосферы, включая оценку состава и размера промышленных пылей, актуальна и находится на стадии накопления информации и поиска новых идей, разработанная программы-методика по исследованию факторов и процессов развития взрывов сульфидной пыли, влияющих на пылевзрывобезопасность.

Для исследования факторов и причин процессов развития взрывов сульфидной пыли разработана Программа и соответствующие методики исследований, включающая:

- геолого-минералогическое исследование вещественного состава руд и пород;
- определение содержания серы;
- исследование процессов самовоспламенения сульфидной пыли;
- изучение термической активности пылей различных классов крупности;
- последующую разработку технологических рекомендаций.

Для определения формы нахождения сульфидов в рудах и породах месторождений и оценки их свойств при проведении буровзрывных работ изучали

фазовый и минералогический состав анализируемого материала. В изучении взрывчатых свойств сульфидной пыли первоочередным являлось проведение комплекса методов оптической микроскопии, включающего оптико-петрографический и минераграфический анализы для получения полной информации о минеральном (фазовом) составе и структурно-текстурных особенностях горных пород и руд. Комплексование методов минералогического анализа позволяет получить необходимую и достоверную информацию о вещественном составе и строении горных пород и руд.

Оптико-петрографический метод позволяет выявить особенности строения горных пород, диагностировать нерудные минералы, уточнить взаимоотношения между ними, судить об условиях и последовательности их формирования.

Минераграфический метод позволяет идентифицировать рудные минералы, имеющие отражение более 10%, определять их морфоструктурные особенности и последовательность выделения минералов. Таким образом, представляется возможным определить поведение руды в целом и отдельных ее минералов (в нашем случае сульфидов серы) с привязкой к интересующему технологическому процессу.

При проведении геолого-минералогической оценки учитывались прочностные характеристики - хрупкость и твердость каждого минерала по шкале Мооса.

Работы проводятся согласно требованиям, представленным в ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. [41], ГОСТ Р 8.563-96 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики выполнения измерений. [42].

Минералогические работы регламентированы методической документацией, утвержденной Научным советом по минералогическим методам исследования:

- МУ НСОММИ №31 Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ [84].

- МР НСОММИ № 111 Петрографический анализ магматических, метаморфических и осадочных горных пород [82].

- МР НСОММИ №194 Минераграфическое изучение руд [83].

Определение содержания сульфидной серы в соответствии с «Инструкцией по предупреждению взрывов сульфидной пыли ...» [54] основным фактором,

характеризующим взрывоопасность сульфидных руд является содержание в них пиритной серы.

Одним из эффективных методов определения содержания большого числа элементов в различных типах горных пород, почвах, отложениях и растительных материалах является рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) [103-104]. Существенным преимуществом метода является его экспрессность - анализ образца почвы занимает несколько минут.

Для определения содержания серы в нашем случае использовали рентгенофлуоресцентный анализатор Olympus X-5000 Mobile XRF (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 - Мобильная система для полевого анализа химического состава металлов, жидких и порошковых проб Olympus X-5000 Mobile XRF

При проведении исследований в лабораторных условиях определяют содержание серы в образцах. Для проведения таких исследований материал проб измельчают с помощью дробильного оборудования и методом ситового анализа отбирают отсев фракции -40 мкм. Для каждой пробы испытания проводят 3 раза, и для установления закономерностей принимают усредненное значение.

Рентгенофлуоресцентные анализаторы (РФА спектрометры) – приборы для определения концентрации химических элементов в монолитных и многослойных образцах методом рентгеновской флуоресценции. Рентгенофлуоресцентная спектрометрия (общепринятое обозначение - XRF, РФА, РФС) - метод анализа, используемый для определения концентраций элементов в веществах и материалах различного происхождения. Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) широко распространен как в промышленности, так и в науке, благодаря своей универсальности, точности и скорости измерений, а также простоте эксплуатации.

Принцип работы заключается в следующем, используется метод, основанный на измерении спектра вторичного рентгеновского излучения. Исследуемый образец облучается рентгеновской трубкой. В результате взаимодействия рентгеновского излучения с веществом в используемом образце возникает вторичное флуоресцентное излучение, в спектре которого присутствуют характеристические линии тех элементов, которые входят в состав образца. Наличие в спектре линий данного элемента свидетельствует о присутствии его в образце, а интенсивность этих линий позволяет судить о концентрации элементов. По пикам полученного спектра качественно определяют, присутствие элемента в образце [4].

Определение температуры самовоспламенения образцов руды и пород проводят в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. Испытание на самовозгорание выполнено по п.4.9.» [33].

Для нагревания образцов используют печь Н 60 с терморегулятором В130. Нагрев осуществляется в воздушной среде. Масса навесок составляет $3,0 \text{ г} \pm 0,1 \text{ г}$.

Схема печи представлена на рисунке 2.3.

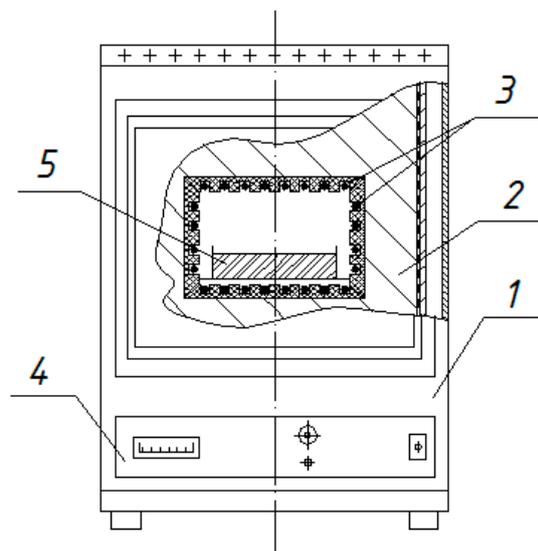


Рисунок 2.3 - Схема печи: 1 – корпус; 2 – теплоизоляция; 3 – нагреватель; 4 – блок управления; 5 – нагреваемая садка

Печь состоит из металлического корпуса - 1 и нагревателей - 3, расположенных на верхней, нижней и боковых стенках рабочей камеры. На передней и задней стенках печи нагреватели отсутствуют. Рабочее пространство электропечи образовано разъемными керамическими фасонами. Пространство между фасонами и корпусом заполнено

теплоизоляцией. В нижней части установлена пусковая и контрольно-регулирующая аппаратура - 4.

Нагрев рабочей камеры производят до температуры 500 °С. После установления в рабочей камере стационарного температурного режима, из камеры извлекают муфельный тигель, заполняют его образцом, за время не более 15 с и помещают внутрь камеры. Тигель с образцом выдерживают в печи 20 мин. Следующее испытание проводят при температурах 550 и 600 °С. Если при заданной температуре испытания наблюдается самовоспламенение, то следующее испытание проводят при температуре, с уменьшением на 50°С. Рекомендуемое количество проводимых опытов, при каждой температуре, - 3 раза. По истечении 20 минут, или если до момента полного прекращения дымовыделения самовоспламенение не фиксируют, испытание прекращают, в протоколе фиксируют отказ.

Данный метод позволяет дать оценку самовоспламенения слоя сульфидной пыли, отложившегося на стенках выработки и рабочих органах горного оборудования под действием высоких температур без воздействия УВВ.

Определение показателей взрывоопасности сульфидной пыли включает оценку каталитического влияния образца сульфидных руд и пород на состояние массива при зарядании или взрыве ВВ. В практике для исключения преждевременного саморазогрева сульфидной пыли и ВВ при зарядании скважин/шпуров, рудничную пыль подвергают экспериментальному исследованию на предмет каталитического влияния исследуемого образца на термораспад методом синхронного термического анализа (СТА).

Синхронный термический анализ – это метод, сочетающий методы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА) при одном измерении.

На рисунке 2.4 представлен спектр задач, решение, которых достигается с помощью СТА при исследовании руд и пород.

Принципиальной основой термического анализа является – изучение свойств вещества и процессов, происходящих в них, при нагревании (или охлаждении) по определенно заданной температуре. Метод ТГА основан на регистрации изменения массы образца в зависимости от температуры, а также фиксирует количество

выделившегося/поглощенного тепла. Основным принципом метода ДСК является количественная оценка тепловых эффектов.



Рисунок 2.4 - Задачи, решаемые методом синхронного термического анализа

Опираясь на общеизвестное знание о том, что, взрыв пыли [31]:

- это быстропротекающий физико-химический процесс;
- происходит с выделением энергии за короткий промежуток времени;
- происходит с резким убыванием массы, то есть сгоранием частиц.

На основании вышеизложенного представляется перспективным использовать СТ-анализ для изучения поведения частиц пыли различного дисперсного состава. В том числе, это позволит определить размер частиц пыли, проявляющих термическую активность за счет регистрации характера протекания реакции, изменения массы образца и выделением тепла. Для инициации развития экзотермической реакции и выявления химической активности пыли различного дисперсного состава в качестве вещества, ускоряющего реакцию, принята аммиачная селитра.

Стоит отметить, что в промышленных условиях часто наблюдается интенсивное разложение аммиачной селитры в присутствии сульфидосодержащих шламов: испарение и фонтанирование, вспышки заряженных аммиачно-селитренных ВВ в шпурах и скважинах. Природа этого явления – каталитическое (ускоряющее) действие содержащихся в горных породах сульфидов, особенно персульфидов, по реакции разложения аммиачной селитры. Применение данной методики актуально для установления совместимости, используемых ВВ при зарядании шпуров и скважин.

Преимуществом синхронного термического анализа является то, что данный метод включает в себя комплексный метод, основанный на совмещении в одном измерении дифференциальной сканирующей калориметрии – ДСК и термогравиметрического анализа - ТГ.

Рекомендуемое к использованию оборудование - прибор синхронного термического анализа, например, STA 449 F3 Jupiter «Netzsch», Германия (рис.2.5).



Рисунок 2.5 - Внешний вид прибора синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter.

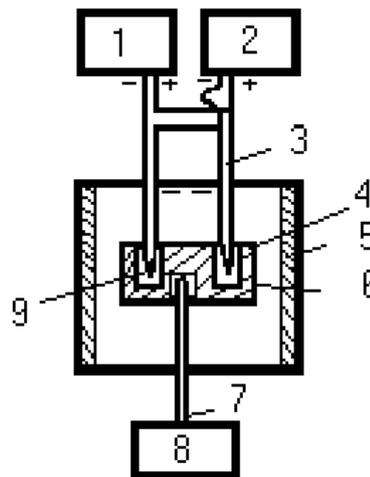


Рисунок 2.6 - Схема прибора для дифференциально-термического анализа.

Термогравиметрический анализ представляет собой метод измерения массы вещества в процессе изменения его температуры по заданной программе.

Метод дифференциальной сканирующей калориметрии позволяет регистрировать потоки энергии, необходимые для достижения исследуемым веществом температуры стандарта сравнения в схожих условиях.

Принципиальная схема прибора приведена на рисунке 2.6. Основными рабочими элементами прибора являются: 1 – регистратор разности температур; 2 – регистратор температуры образца; 3 – комбинированная термопара; 4 – блок для исследуемого образца и инертного вещества; 5 – печь; 6 – ячейка с исследуемым образцом; 7 – термопара; 8 – программный регулятор нагрева печи; 9 – ячейка с инертным веществом.

Как было сказано ранее, значительным преимуществом данного метода исследования является то, что на основании результатов, полученных методом синхронного термического анализа, представляется возможным исследовать и определять [4]: температуры и теплоту фазовых переходов; степень кристалличности;

стеклование; полиморфизм; изменение массы; наличие/отсутствие примесей; температурную стабильность; кинетику реакций окисления/восстановления коррозии.

Для установления качественных показателей представленных горных пород были проведены была проведена подготовка образцов с последующим экспериментом.

Представленные образцы предварительно измельчают в дробилке, далее методом ситового анализа отбирают пробы, крупностью: -40 мкм; -71+40 мкм, -100+71 мкм; -125+100 мкм. Для исследования взрывчатых свойств сульфидной пыли, формируемой в атмосфере рудника, производят нагрев образцов в смеси с аммиачной селитрой для различных классов крупности пыли методом СТА. Далее, образец вещества в виде порошка или гранул равномерно распределяют по дну алюминиевого тигля и уплотняют. Тигель с образцом, закрытый крышкой, устанавливают на держателе прибора с термопарой типа S, чувствительностью 1 мкВт. Нагрев образца от 30 до 300/600 °С со скоростью 10/20 °С/мин. происходит в атмосфере аргона (20 мл/мин). Контроль и сбор данных осуществлялся с помощью электронной системы и пакета программ NETZSCH-Proteus. Анализ данных выполнен в программе Proteus Analysis.

Перечень оборудования и использованных средств для выполнения экспериментальных исследований включал:

- лабораторные аналитические весы;
- дробилка щековая ДЛЩ 80×150;
- мельница-дробилка конусная ВКМД10;
- просеивающая машина EML 200;
- печь Н 60 Е с терморегулятором В130 с фурнитурой и подставкой;
- тигель графитовый огнеупорный;
- щипцы тигельные;
- СТА-анализатор.

Дополнительно для комплексной оценки взрывчатости сульфидной пыли, в соответствии с методикой, проводится изучение геологического строения массива руд месторождения; анализ горнотехнических условий разработки месторождения; обобщение многолетнего опыта разработки месторождений сульфидных руд, а также нормативно-регламентирующей документации по предупреждению взрывов сульфидной пыли, преимущественно на подземных рудниках.

Комплекс перечисленных мер позволяет разработать технико- технологические рекомендации и профилактические мероприятия по предупреждению образования взрывоопасных концентраций сульфидной пыли и ее аэрозоля.

Разработанная методика изучения главных факторов опасности в области пылевзрывобезопасности применима, как к убогосульфидным рудам, так и к рудам с высоким содержанием серы и является составной частью системы промышленной безопасности рудника по добыче сульфидных руд. Предложенная методика обеспечивает возможность анализировать и оценивать состояние потенциальных источников опасности, оперативно выявлять вероятность и возникновение последствий воздействия различных внешних факторов на условия безопасной разработки месторождений, что способствует росту устойчивости функционирования всей горнотехнической системы и в целом экологически сбалансированному и безопасному освоению недр.

Выводы по главе 2

1. Определены основные направления и этапы развития научно-методических основ в области пылевзрывобезопасности с учетом интенсификации горных работ. Обосновано, что применяемые в настоящее время способы предотвращения взрывов сульфидной пыли, либо технологически сложны в применении, либо малоэффективны, а возрастающие потребности в рудном сырье вызывают необходимость совершенствования нормативной базы, регламентирующей безопасное и эффективное освоение недр.

2. В результате комплексной оценки установлено, что в связи с истощением минерально-сырьевой базы России произошло значительное изменение технологических процессов, влияющих на образование пыли в подземных условиях, а именно: повсеместное внедрением мобильного транспорта, ставшего новым источником пыления в подземных условиях, повышение интенсивности ведения буровых и взрывных работ, связанное с:

- произошедшим техническим перевооружением подземных рудников;
- с увеличением количества бурения шпуров и скважин, в том числе увеличенного диаметра, увеличением объемов взрывааемых руд и пород, увеличением расхода ВВ;
- снижением содержания ценного компонента в руде.

3. Обоснованно, что длина выработки, подлежащей обработке – увлажнению, смыву пыли со стенок выработки определяется исходя из размеров зоны опасной по возгоранию колчеданной пыли. Длина орошения выработки должна определяться исходя из определения массы мелкодисперсных частиц пород, выбрасываемых в пространство выработки при взрыве и определения расстояния, при котором возможно возгорание колчеданной пыли под действием УВВ.

4. Приведены необходимые и достаточные условия для воспламенения сульфидной пыли в рудничной атмосфере: наличие взрывоопасной концентрации пыли; содержание взрывоопасной концентрации серы в руде; нагрев сульфидной пыли до температуры не ниже температуры вспышки; превышение выделившегося тепла в зоне горения над тепловыми потерями; тепловая мощность источника горения должна быть достаточной для воспламенения ($\Delta P = \Delta P_{\text{крит}}$).

5. Обоснована и разработана программа-методика выполнения исследований по определению взрывчатости сульфидной пыли на основе изучения геолого-структурных особенностей колчеданных руд и пород и физико-химических свойств сульфидной пыли для снижения риска возникновения взрывов сульфидной пыли.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ И ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВОВ СУЛЬФИДНОЙ ПЫЛИ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

3.1. Геолого-структурная оценка руд месторождений Новый Сибай, Сентачан и Шануч

Как было показано в литературном обзоре состояния исследуемого вопроса, зачастую на практике руды, даже с содержанием серы менее 35 %, могут представлять опасность по фактору взрыва сульфидной пыли, хотя в лабораторных условиях рудничная пыль содержанием серы менее 35 % не взрывается. Для выявления причины отмеченного явления и последующей разработки адекватных технических решений, направленных на обеспечение безопасности ведения подземных горных работ, было выполнено исследование изменения содержания серы в различных фракциях рудничной пыли, полученных в результате первичной дезинтеграции. Для этого в рамках исследования была сформулирована гипотеза о том, что в результате первичного разрушения сульфидной руды происходит неравномерное распределение серы в измельченной руде в различных классах крупности.

Для проверки сформулированной гипотезы на первом этапе было выполнено исследование, включающее измерение содержания серы для сульфидных руд различных классов крупности, полученных в результате первичного измельчения руд месторождений Новый Сибай, Сентачан и Шануч.

Пробоподготовка включала:

1. изготовление геологических шлифов и анализ минерального состава проб руды и пород;
2. измельчение образцов с помощью лабораторной щековой дробилки до фракции -5-0 мм;
3. полученный материал измельчался до крупности -250-0 мкм в лабораторной конусной дробилке ВКМД10;
4. с помощью просеивающей машины EML 200 подготавливались фракции, крупность -40; -71+40; -100+71; -125+100; -160+125; -200+160; -250+200 мкм. Для этого материал загружался в сита просеивающей машины, время просеивания составляло 40 мин, интервал просеивания – 10 минут, амплитуда – 2 мм;
5. для РФА пробы каждой фракции засыпали в специальные кюветы и накрывали пленкой.

Фракции -40; -71+40; -100+71; -125+100; -160+125; -200+160; -250+200 мкм подготавливались для каждого типа руд и пород.

Необходимо особо отметить, что исследования были выполнены для фракций руд, подвергнувшихся только первичной дезинтеграции. Данное уточнение является ключевым в рамках исследуемого вопроса, так как позволяет оценить аналогичные результаты первичного дробления после проведения взрывных работ в условия подземной разработки сульфидных руд и установить характер распределения содержания серы в зависимости от крупности измельчения пылевых частиц.

Серно-колчеданная порода месторождения Новый Сибай (маркировка пробы СИ19/7) - плотный минеральный агрегат пирита. В нем наблюдаются поры разных размеров и конфигураций. Содержание серы в различных классах крупности приведено на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 - Содержания серы в различных классах крупности серно-колчеданной породы месторождения Новый Сибай (проба СИ19/7)

Из приведенного графика видно, что наиболее мелкие фракции руды, полученные в результате первичной дезинтеграции, характеризуются повышенным содержанием серы. Для фракции -40 мкм содержание серы на 3,6 % выше среднего по образцу, что составляет 8,57 % в относительном выражении. При этом содержание серы во фракциях -40 мкм и -71+100 мкм отличаются на 6,53 %, что составляет 15,54 % относительно среднего содержания по образцу. С увеличением крупности частиц свыше 100 мкм содержание серы в серно-колчеданной руде носит постоянный характер и приближено к среднему значению.

Для определения природы выявленного распределения содержания серы был выполнено исследование образцов руды методом оптической микроскопии. В

результате было установлено, что сложение руды – массивное, с заметным развитием трещиноватости. Структура – коллоидная и метаколлоидная, характеризующаяся тонким проращением минералов с выделением концентрических, сферолитовых и шариковых минеральных агрегатов пиритного и сфалерит-пиритного составов (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 - Внешний вид серноколчеданной руды

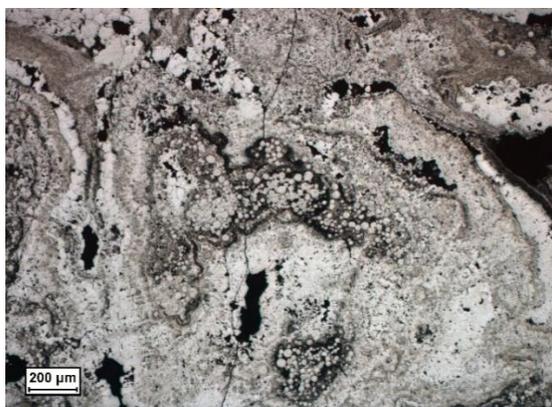
Строение агрегатов - неоднородное, сетчатое, пористое с радиальными и концентрическими трещинками усыхания.

Минеральный состав:

- главный рудообразующий минерал – пирит;
- второстепенный рудообразующий минерал - сфалерит.

Пирит в руде образует следующие морфологические разновидности: почковидную концентрически-зональную, кружевную и фрамбоидальную, представленную сферическими агрегатами, которые образуются за счет скоплений микрокристаллов пирита (рис. 3.3).

а)



б)

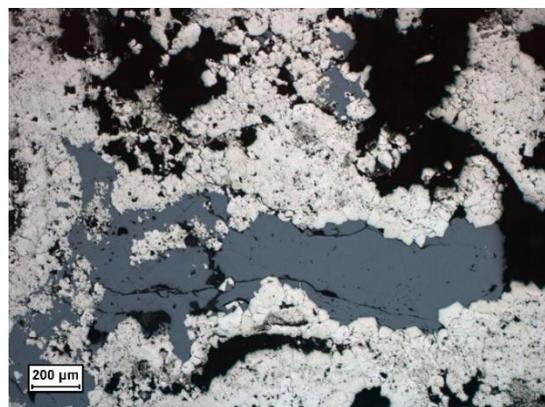


Рисунок 3.3 - Кружевные выделения пирита (а) и ксеноморфные образования сфалерита (б). Отраженный свет, николи параллельны

Почковидные агрегаты пирита хорошей сохранности редки. Форма выделений - округлая или овальная (рис. 3.3-а). Строение таких стяжений - концентрически-зональное, мощность зон и размеры слагающих зерен уменьшаются от центра к периферии. Нередко центральная часть таких агрегатов - пористая или полая.

Кружевные агрегаты представляют собой прозрачное плетение мелкозернистого пирита. Центральная часть и пространство между элементами кружев выполнены другими рудными и нерудными минералами.

Фрамбоидальный пирит характеризуется круглыми выделениями с сотообразным внутренним строением. Он встречается в виде рассредоточенных образований или их скоплений в центральных частях почковидных агрегатов пирита (рис. 3.3-а). Размер скоплений микрокристаллов пирита не превышает 20-100 мкм.

Сфалерит образует ксеноморфные выделения в центральной части, по радиальным и концентрическим трещинам или даже отдельным зонам в пиритных почковидных и кружевных агрегатах (рис. 3.3-б).

Для выявления зависимостей между микроструктурой руды и характером распределения серы по фракциям после первичного измельчения были проведены дополнительные исследования.

Медно-колчеданная руда месторождения Новый Сибай (СИ19/6) представляет собой плотный минеральный агрегат пирита с равномерной медной минерализацией. На поверхности образца участками наблюдается развитие сульфатов железа в виде налета белого цвета (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 - Внешний вид медно-колчеданной руды

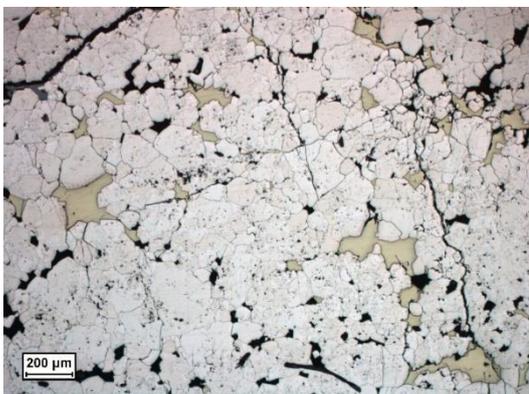
Руда характеризуется однородным сложением (массивным), с заметным развитием трещиноватости. Структура – неравномерно зернистая: от мелко- до среднезернистой.

Минеральный состав:

- главный рудообразующий минерал - пирит;
- второстепенные минералы - халькопирит и сфалерит.

Пирит формирует основную массу медного колчедана. Форма выделения серного колчедана – крупнозернистые агрегаты, участками фиксируется перекристаллизация пирита с формированием хорошо образованных кристаллов в виде сечений гексаэдра (рис. 3.5).

а)



б)



Рисунок 3.5 - Ксеноморфные выделения халькопирита (а) и сфалерита (б) в пиритном агрегате. Отраженный свет, николи параллельны

Размеры зерен пирита варьируют в широких пределах до 100 мкм и более, причем, нередко это можно видеть в одном поле зрения микроскопа.

Халькопирит тесно ассоциирует с пиритом и представлен аллотриоморфными выделениями, форма которых определяется конфигурацией пор, трещинных полостей, межслоевого пространства и интерстициями зернистых агрегатов пирита (рис. 3.5-а). Размеры халькопирита достигают более 250 мкм.

Сфалерит встречается в подчиненном количестве. В руде он присутствует в виде ксеноморфных выделений, выполняя полости трещин, пор в пиритном агрегате (рис. 3.5-б).

Для медно-колчеданной породы пробы СИ19/6 месторождения Новый Сибай было выполнено исследование изменения содержания серы для различных классов крупности, результаты которого приведены на рисунке 3.6.

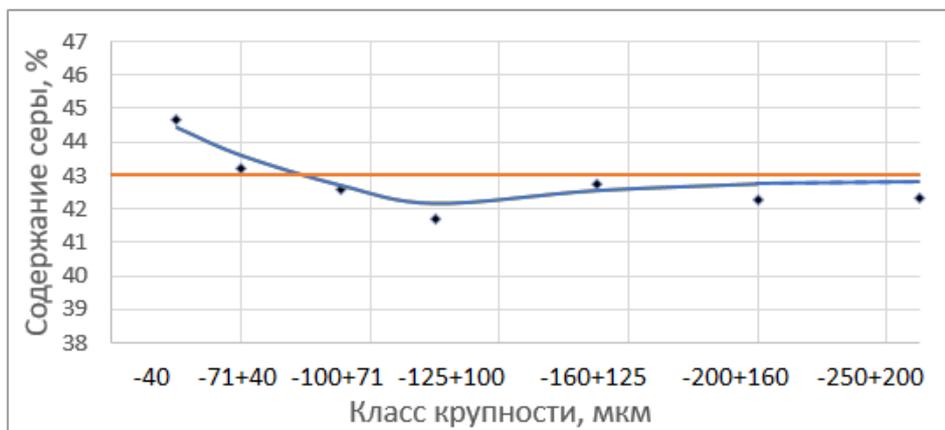


Рисунок 3.6 - Изменение содержания серы для различных классов крупности медно-колчеданной породы месторождения Новый Сибай (проба СИ19/6)

Из приведенного графика следует, что исследованная проба характеризуется незначительной изменчивостью содержания серы в различных фракциях руды, измельченной в результате первичного дробления, и составляет порядка 5% относительно среднего содержания серы в образце.

Обломки кварц-антимонитовой руды месторождения Сентачан (проба Т-1) серого цвета с белыми пятнами, сложенными кварцем (рисунок 3.7).

а)



б)

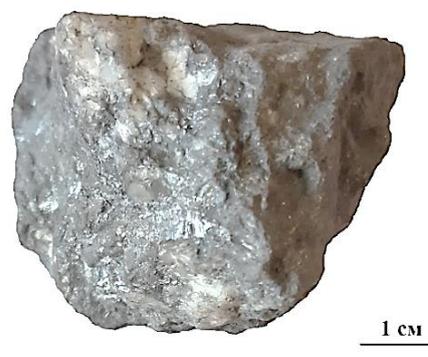


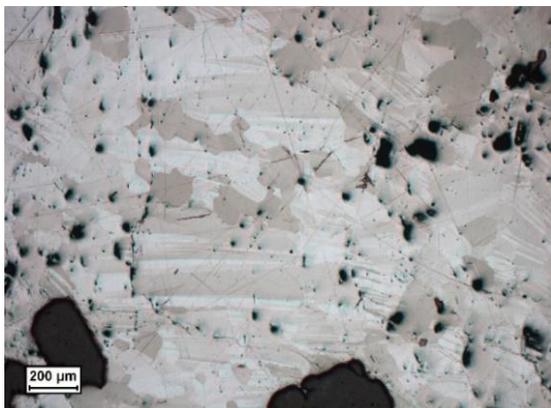
Рисунок 3.7 - Внешний вид кварц-антимонитовой руды (проба Т-1)

Текстура руды по соотношению рудного и нерудного минерала – массивная, до вкрапленной, участками наблюдается пятнистое сложение. Руда - трещиноватая. Структура мелкозернистая, гранобластовая при которой руда сложена изометрическими зернами.

Минеральный состав руды представлен кварцем (35 – 45%) и антимонитом (55 – 65%), в подчиненном количестве присутствует арсенопирит. Массивные руды сложены мелкозернистым антимонитом, участками прослеживаются структуры

перекристаллизации, характеризующиеся гранобластовым строением (рис.3.8-а). Размер зерен 10-50 мкм.

а)



б)

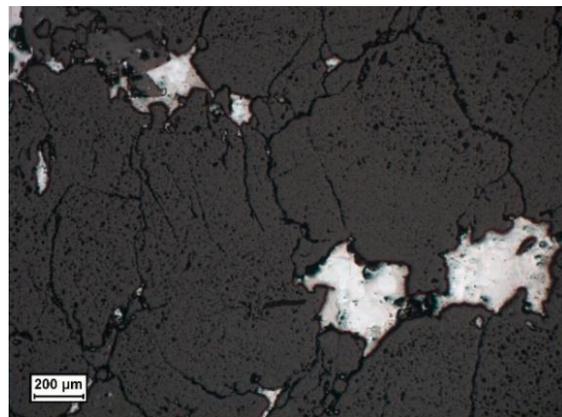


Рисунок 3.8 - Массивное (а) и вкрапленное (б) сложение антимонитовой руды. Отраженный свет, наколи параллельны

Такие преобразования оказывают влияние на форму зерен антимонита, обусловленную его гетерогенностью. В руде часто присутствуют гипидиоморфно-зернистые массы, постепенно переходящие в аллотриоморфные агрегаты.

Внутреннее строение зерен характеризуется структурами двойникования (рисунок 3.8-а), выраженными в широком развитии пластинок антимонита, вероятно связанными с проявлением процессов деформации. Следует отметить, что в массивных минеральных агрегатах (рис.3.8-б) наблюдается чередование зерен с двойниковым строением и без двойникового строения.

В кварце и антимоните встречается арсенопирит, образуя полигональные выделения (рисунок 3.9). Средний размер - 120 мкм.

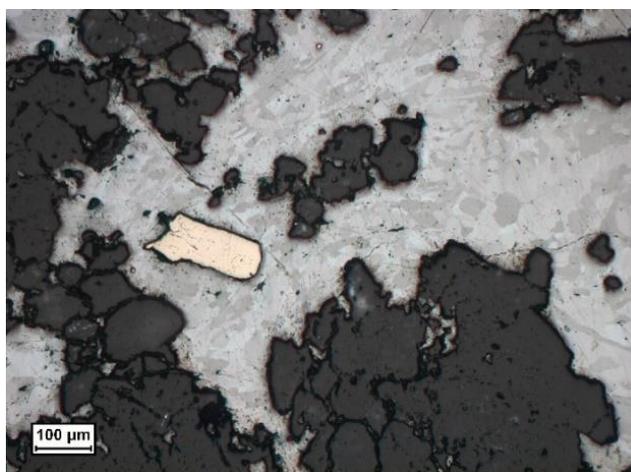


Рисунок 3.9 - Выделение арсенопирита в антимонитовом минеральном агрегате

Для показанной на рисунке 3.7 пробы Т-1 месторождения Сентачан было выполнено исследование изменения содержания серы для различных классов крупности, результаты которого приведены на рисунке 3.10.

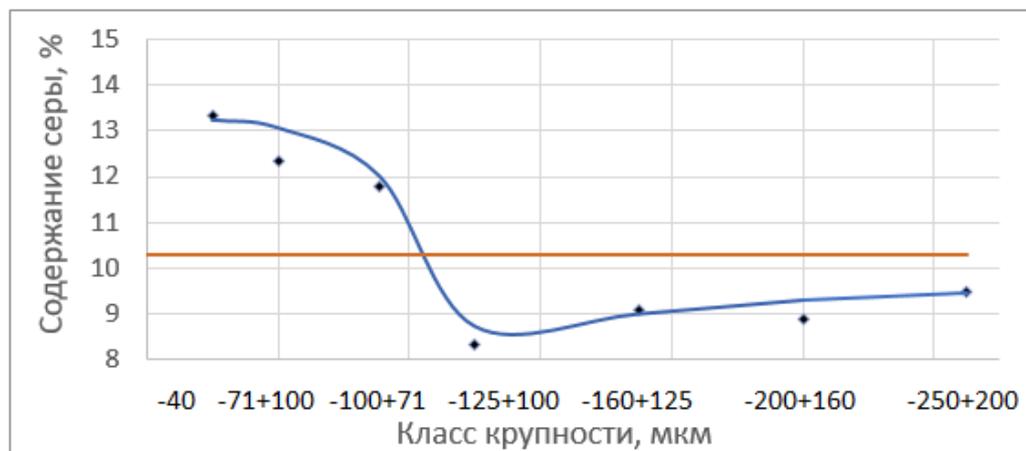


Рисунок 3.10 - Изменение содержания серы для различных классов крупности серно-колчеданной руды месторождения Сентачан (проба Т-1)

Из приведенного графика следует, что исследованная проба характеризуется значительной изменчивостью содержания серы в различных фракциях руды, измельченной в результате первичного дробления. Для фракции -40 мкм содержание серы на 2,9 % выше среднего по образцу, что составляет 28,34 % в относительном выражении. При этом содержание серы во фракциях -40 мкм и -125+100 мкм отличаются на 4,49 %, что составляет 43,56 % относительно среднего содержания по образцу.

Проба ТП №40/3, отобранная на месторождении Шануч и представленная гранито-гнейсами, габбро и вкрапленными рудами (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 - Внешний вид руды, представленной в пробе ТП №40/3

Структура руды - среднезернистая. Нерудная часть сложена амфиболом, хлоритом, кварцем, полевым шпатом, серпентином, карбонатом.

Амфибол – самый распространенный нерудный минерал, его содержание достигает 63%. По оптическим и морфологическим особенностям можно выделить две разновидности амфибола – призматический и игольчатый. Вторая разновидность имеет широкое распространение и представлена актинолитом, образующим игольчатые минеральные агрегаты нематобластовой сноповой структуры.

Кварц и полевые шпаты (плагиоклаз и калиевый полевой шпат) являются второстепенными минералами, их содержание составляет около 16%. В породе наблюдаются обособления или гнезда минеральных агрегатов кварцевого и кварц-полевошпатового состава. Кварц образует ксеноморфные выделения, размером 100 – 200 мкм. Зерна полевого шпата характеризуются короткопризматическим габитусом. Размер зерен достигает 500 мкм по удлинению. Степень изменения полевых шпатов различная, в большей степени начальная. Халькопирит – второй по распространенности рудный минерал, его содержание достигает 6%. В руде (рис. 3.12-а) он присутствует в виде ксеноморфных выделений, образуя вкрапления в пирите и самостоятельные поля.

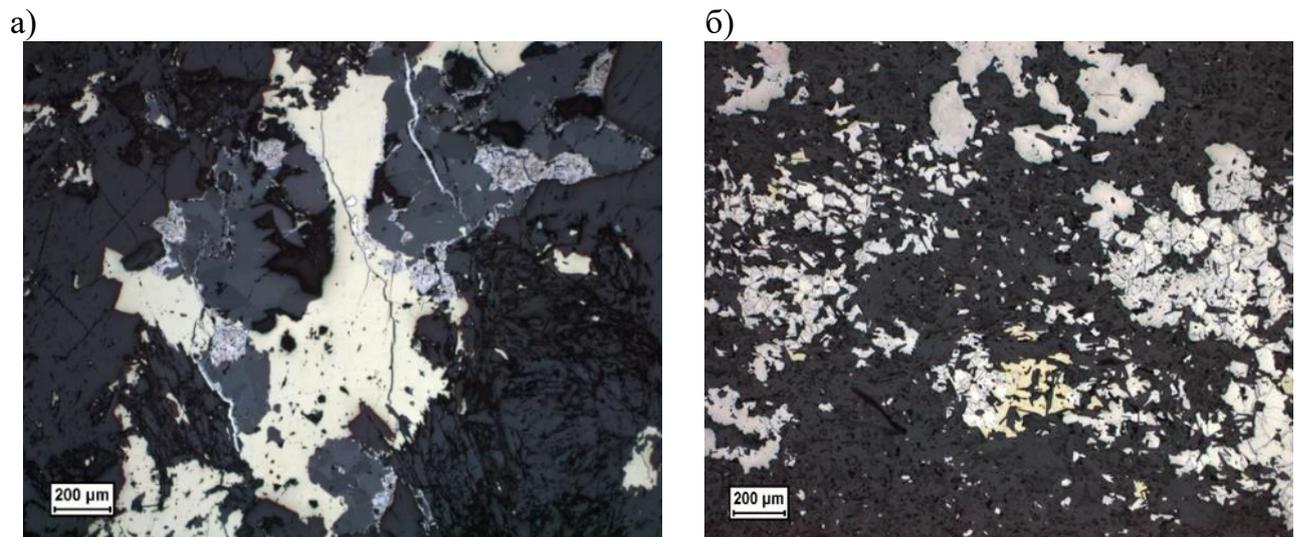


Рисунок 3.12 - Ксеноморфные выделения халькопирита (а) и вкрапленная сульфидная минерализация (б). Отраженный свет, николи скрещены

Минералогические исследования представленных проб гранито-гнейсов, измененной кварц-гидрослюдисто-хлоритовой породы с сульфидной минерализацией и прожилково-вкрапленных руд показали, что сульфидная минерализация отсутствует в гранито-гнейсах. В пробах измененной породы и прожилково-вкрапленных руд сульфидная минерализация представлена пиритом, халькопиритом и виоларитом, характер распределения неравномерный.

На рисунке 3.12-б сульфиды образуют одиночные вкрапления с равномерным распределением в порфиридных образованиях гидрослюдистых агрегатов. Размер вкраплений не превышает 20 мкм.

Также в образце наблюдается сгущение вкраплений с образованием пятен, здесь преобладают более крупные выделения пирита – 40 мкм, халькопирита – 200 мкм и виоларита – 100 мкм. Форма выделений ксеноморфная, структура - от мелко до среднезернистой Сульфиды встречаются в виде отдельных вкрапленников и минеральных сростков (рис. 3.12-б).

Для пробы ТП 40/3 месторождения Шануч было выполнено исследование изменения содержания серы для различных классов крупности, результаты которого приведены на рисунке 3.13.

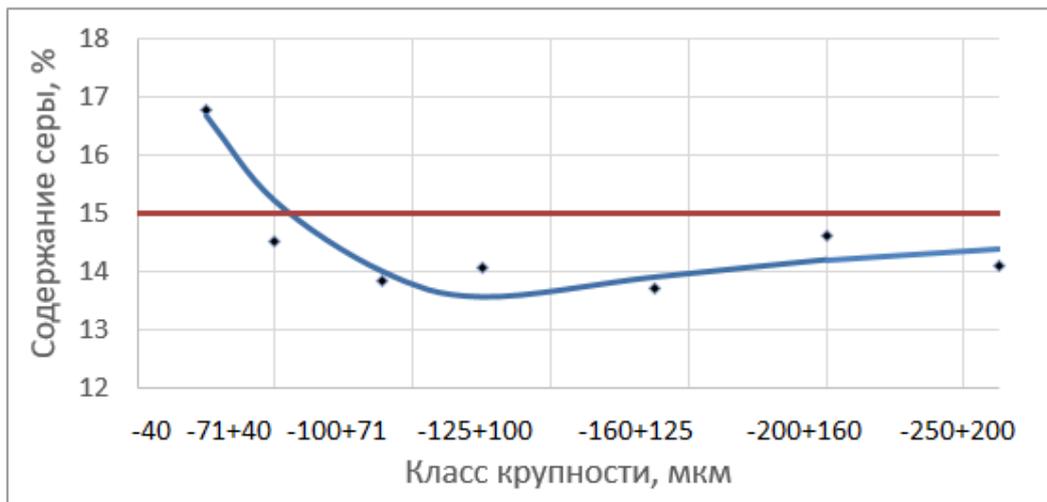


Рисунок 3.13 - Изменение содержания серы для различных классов крупности руды месторождения Шануч, представленной гранито-гнейсами (проба ТП 40/3)

Наблюдается эффект перераспределения содержания серы между фракциями руды при первичном ее дроблении. Руда мелко и среднезернистая, как видно из графика, для фракции -40 мкм содержание серы на 1,67 % выше среднего по образцу, что составляет 11,13 % в относительном выражении. При этом содержание серы во фракциях -40 мкм и -125+100 мкм отличаются на 3,11 %, что составляет 20,7 % относительно среднего содержания по образцу.

Результаты геолого-минералогического анализа проб месторождений Новый Сибай, Сентачан и Шануч сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты анализа геолого-минералогической оценки

Характеристики	Медный колчедан (Новый Сибай, СИ 19/6)		Серный колчедан (Новый Сибай, СИ 19/7)		Гранито-гнейсы (Шануч, ТП40/3)		Кварц-атимонитовая руда (Сентачан, Т-1)	
Минеральный состав руды (твердость по шкале Мооса)	Пирит (6-6,5) Халькопирит (3-4) Сфалерит (3,5-4)		Пирит (6-6,5) Сфалерит (3,5-4)		Кварц (7) Амфибол (6) Полевой шпат (6-6,5) Актинолит (6,5) Пирит (6-6,5) Халькопирит (3-4), Виоларит (4,5-5,5)		Кварц (7) Антимонит (2-2,5) Арсенопирит (5,5)	
Структурно-текстурные особенности нахождения сульфидных минералов	Крупнозернистый Аллотриоморфный		Среднезернистый Фрамбоидальный Почковидный Сотообразный		Мелкозернистая Среднезернистый Ксеноморфная Прожилко-вкрапленный		Мелкозернистый Гранобластовый	
Крупность зерен сульфидных минералов, мкм	≥250		20-100		20-200		10-120	
Содержание серы, % Максимальное Минимальное В усредненной пробе	S, %	Класс крупности, мкм	S, %	Класс крупности, мкм	S, %	Класс крупности, мкм	S, %	Класс крупности, мкм
	44,43	-40	45,66	-40	16,67	-40	13,22	-40
	42,16	-125+100	39,13	-100+71	13,56	-125+100	8,73	-125+100
	43	-	42	-	15	-	10,3	-
Наибольшее отклонение содержания серы, %	абс.	2,27	6,53	3,11	4,49			
	отн.	5	15,54	20,7	43,56			

По данным таблицы 3.1 характерной особенностью является то, что в образце с наибольшим относительным изменением содержания серы – 43,56%, представленной кварц-антимонитовой рудой, минеральный состав представлен кварцем с коэффициентом твердости 7 по шкале Мооса, антимонитом – коэффициент крепости 2-2,5 и арсенопиритом – коэффициент крепости 5,5. Таким образом в процессе дезинтеграции руды первичному разрушающему импульсу подвержены минералы, имеющие наименьший коэффициент крепости – антимонит и арсенопирит. В дополнение структура руды характеризуется, как мелкозернистая и гранобластовая, при которой минералы образуют зерна относительно одинакового размера и имеют ярко выраженную изометрическую, аллотриоморфную форму с четкими границами, что облегчает отделение сульфида в процессе разрушения. Это объясняет, почему содержание серы увеличивается по мере уменьшения крупности частиц. Таким образом, в рудничных условиях при разрушении горного массива первоочередно произойдет выброс пылевых частиц, минералы которых имеют наименьший коэффициент твердости и наиболее четкую форму зерна.

На основании этого справедливо отметить, что в случае, когда минералы сульфидов имеют меньшую хрупкость и твердость, в отличие от сопутствующих им, в первую очередь измельчению будут подвержены сульфиды, что влечет за собой риск возникновения взрыва сульфидной пыли, содержащей серу в количестве достаточном, для развития экзотермической реакции.

Необходимо отметить, что минералы сульфидов также характеризуются повышенной хрупкостью, в связи с чем при механическом воздействии – бурении и взрывном разрушении обладают повышенной склонностью к образованию пыли.

Аналогичная закономерность распределения серы в руде отмечена в пробе, представленной гранито-гнейсами, где минеральный состав представлен кварцем, амфиболом, полевыми шпатами, актинолитом диапазон твердости, которых – 6,5-7, сульфидные минералы представлены пиритом, халькопиритом и виоларитом, их твердость по шкале Мооса – 3-6,5.

График распределения содержания серы на рисунке 3.13 показывает, как с увеличением крупности уменьшается содержание серы на 20,7 % в относительном отклонении.

Для медного и серного колчеданов (СИ 19/6 и СИ 19/7), минеральный состав руд и пород представлен исключительно сульфидами различной твердости, поэтому в данном случае величина относительного изменения содержания серы колеблется незначительно – от 5 до 15%. Таким образом, количество содержания серы в пыли, формируемой в рудничных условиях, будет зависеть от минералогической характеристики руд и пород.

Согласно данным, приведённым в таблице 3.1, стоит отметить, что в медно-колчеданных рудах, имеющих аллотриоморфную структуру, характеризующуюся тем, что минералы сульфидов не имеют четких очертаний, наименьшее относительное – 5% и абсолютное – 2,27% изменение содержания серы в образцах различных фракций крупности.

При условии, когда структура минерала крупнозернистая, не имеет четких очертаний, а минеральный состав представлен сульфидными минералами – распределение содержания серы в таких рудах и породах различных классах крупности - равномерное.

В то время, как в кварц-антимонитовых рудах с граноблабластовой, ярко выраженной изометрической формой зерен, наблюдаются наибольшее относительное изменение содержания серы – 43,56%. Таким образом, с уменьшением размера зерен сульфидов для всех образцов – от крупнозернистой до мелкозернистой, но с увеличением четкости кристаллографических очертаний минерала возрастает разница в относительном изменении содержания серы в исследуемых рудах и породах различных классов крупности.

На основании сказанного, проведение геолого-минералогических исследований с выявлением и анализом вышеперечисленных факторов обоснованно является неотъемлемой составляющей оценки взрывоопасности сульфидных руд и пород.

В результате анализа результатов, полученных в ходе измерения содержания серы для различных классов крупности, полученных после первичного измельчения руд месторождений Новый Сибай, Сентачан и Шануч и исследования образцов методом оптической микроскопии установлено.

1. Для руд, характеризующихся мелкозернистым, вкрапленным строением, характерно перераспределение содержания серы таким образом, что серы больше в мелких фракциях – -40; -71+40; -100+71 мкм. По мере увеличения крупности исследуемых фракций содержание серы возрастает до значения, равного среднему по образцу. В таких рудах, при переизмельчении и формировании мелких фракций при различных технологических процессах, вероятность формирования взрывоопасного облака пыли выше, чем в крупнозернистых массивных рудах и породах.

2. Строение минерала, содержащего серу, а именно величина его зерен, определяет возможность увеличения содержания серы в мелких фракциях – -40 мкм, образованных в результате первичного разрушения руды, и, следовательно, потенциальную опасность возгорания сульфидной пыли при среднем содержании серы менее 35%.

3. Во всех образцах пыли руд и пород, крупностью свыше 100 мкм, отсутствуют колебания по содержанию серы, его значение приближено к среднему и имеет постоянный характер.

4. Для пород, характеризующихся крупнозернистым, массивным строением, характерно незначительное изменение содержания серы по фракциям, образованным в результате первичного измельчения.

5. Учитывая, что сульфиды являются преимущественно хрупкими минералами, в процессах бурения, взрывания, обрушения и первичной дезинтеграции горных пород, сульфидные минералы с наибольшей хрупкостью будут подвержены большему разрушению, что влечет за собой повышение распределение серы в пылевых аэрозолях и представляет особую опасность при разработке сульфидных месторождений.

6. При анализе сульфидных руд и пород, как основополагающий фактор взрывоопасности в измельченном состоянии должны учитываться:

- минеральный состав образцов, на основании, которого возможно определить среднее содержание серы, дать предварительную оценку по содержанию серы и, как следствие определить потенциальную склонность к воспламенению сульфидной пыли;

- прочностные характеристики – хрупкость минералов, слагающих породу для определения минерала, первоочередно склонного к дезинтеграции;

- размер зерен и форму нахождения сульфида в минерале, определяющие склонность к образованию мелких пылевых частиц с высоким содержанием серы.

Значимость полученной закономерности о перераспределении содержания серы при дезинтеграции колчеданных руд и пород приобретает особое значение с учетом наращивания производственных мощностей и вовлечением в процесс добычи руд с более низким содержанием полезным компонентов. Процессы интенсификации горных работ влекут за собой значительное увеличение интенсивности и объемов пылеобразования за счет роста: количества бурения шпуров и скважин, количества взорванной рудной массы, внедрения мобильного погрузо-доставочного транспорта, ставшего новым источником пыления в подземных условиях, увеличение объемов перемещения горной массы под действием собственной силы тяжести. Таким образом, в результате геолого-минералогической оценки проанализированы: минеральный состав руд и пород, хрупкость и твердость минералов, крупность зерен сульфидов и формой их нахождения, определены закономерности четкости кристаллографического строения сульфидов. Все это оказывает существенное влияние на характер распределение содержания серы при дезинтеграции руд и пород в различных классах крупности пылевых фракций.

На следующем этапе оценки склонности сульфидной пыли к взрывоопасности предусмотрено проведение исследований по изучению термической активности пылевых частиц сульфидной пыли применительно к образцам с высоким и низким содержанием серы.

3.2. Оценка взрывоопасности высокосульфидных руд и вмещающих пород Сибайского медно-колчеданного месторождения

Результаты, выполненной геолого-минералогической оценки показали, что серно-колчеданные породы и медно-колчеданная руда содержат серу в размере 42-43%, что позволяет отнести пыли руд и пород к весьма склонным ко взрыву.

В соответствии с методикой проведения исследований, для изучения динамики процессов окисления и разложения сульфидных руд и пород Сибайского месторождения с последующим определением параметров взрывобезопасности применялся метод синхронного термического анализа (СТА). С использованием дифференциальной сканирующей калориметрии осуществлялась регистрация энергии, которая необходима для достижения исследуемым веществом температуры – стандарта сравнения в идентичных условиях.

Для определения взрывоопасности пыли, формирующейся в ходе подземных горных работ при разработке сульфидных месторождений, анализ был разделен на 2 этапа. Первый предусматривал исследование характера горения вмещающих пород для определения их термической активности. Второй – сульфидсодержащих фракций, представленных пиритным колчеданом и медно-цинковыми рудами с применением вещества катализатора с целью ускорения протекания реакции для выявления термически активных фракций. За начало окисления принималась температура начала тепловыделения, оценивалась монотонная убыль массы. Резкое выделение тепла, сопровождающееся потерей массы, фиксировалось как взрыв.

Ниже описаны основные результаты исследования процессов разложения сульфидов при нагревании в заданном режиме изменения температур. Проба представлена серицит-кварцитовыми породами (маркировка СИ 19/4). Содержание S в образце - 3,6%. По данным практики, такие породы в измельченном состоянии не являются инициаторами окислительных процессов, и при взрыве не поддерживают распространение пламени и горения, поэтому в данном случае применение вещества - катализатора нецелесообразно. Это подтверждается данными ТГ и ДСК кривых, представленных на рисунке 3.14. Для синхронного термического анализа материал усредненной пробы серицит-кварцитовых пород измельчен с помощью дробилки до крупности частиц – - 40 мкм. Это объясняется тем, что в частицах наименьшего класса крупности наблюдается наибольшее содержание серы, а также они имеют наибольшую площадь поверхности нагрева.

На ДСК-кривой (рис. 3.14) фиксируется один эндотермический пик и два экзотермических. Эндотермический пик происходит при температуре 68,6 °С и не сопровождается существенным изменением массы пробы, о чем свидетельствует

анализ ТГ-кривой. Этот пик – начало протекания таких процессов, как удаление межпоровой гравитационно-связанной влаги. Остальные пики на ТГ-кривой отвечают деструкции компонентов в образце – удаление молекулярной влаги при фазовых переходах.

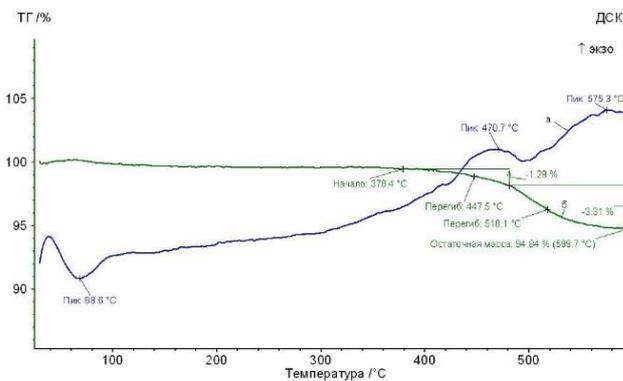


Рисунок 3.14 - Кривые синхронного термического анализа проб серицит-кварцевых пород СИ19/4. На рисунках: синим цветом показаны ДСК-кривые; зеленым – ТГ-кривые

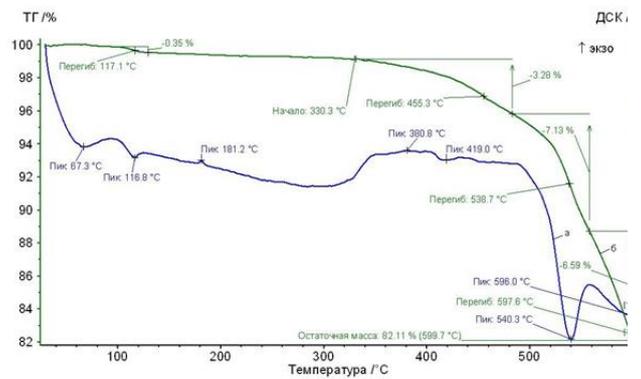


Рисунок 3.15 – Кривые синхронного термического анализа пробы СИ 19/7 (размер частиц – менее 40 мкм). На рисунках: синим цветом показаны ДСК-кривые; зеленым – ТГ-кривые

По ТГ-кривой определено, что разложение основной массы пробы начинается при температуре 378,4 °С, однако, процесс протекает равномерно, без выделения большого количества энергии. Остаточная масса образца при температуре 599,7 °С равна 94,84 %. Изменение массы связано с улетучиванием таких веществ, как вода, элементы S, F, Cl и других, в зависимости от кристаллохимической формулы кварц-серицитовых пород и их примесного состава. Отсутствуют быстропротекающие процессы, сопровождающиеся выделением тепла за короткий промежуток времени с резким уменьшением массы. В целом, кварц-серицитовые породы не могут являться инициатором окисления и не поддерживают процессы взрывного горения. Для них при высоких температурах характерны такие процессы, как стеклование и спекание. Результаты эксперимента свидетельствуют, что, такие породы в массиве являются естественным экраном, предотвращающим горение, а в измельченном состоянии при перемешивании с пылью сульфидных минералов снижают концентрацию серы, тем самым нейтрализуя пылевзрывоопасность.

Рекомендуется при возникновении экзотермических пиков, сопровождающихся резкой потерей массы и выделением значительного количества энергии, исследовать пробы в более широком диапазоне температур до стабилизации процессов убыли массы.

Проба СИ 19/7 представлена серным колчеданом, содержание в усредненной пробе S – 42%, по данным рентгенофлуоресцентного анализа – РФА. Кривые синхронного термического анализа пробы СИ 19/7, с размером частиц менее 40 мкм, представлены на рисунке 3.15.

На ДСК-кривой (рис. 3.15) фиксируется пять эндотермических и два экзотермических пика. В общем виде эти пики соответствуют следующим физическим процессам. Эндотермическое изменение энтальпии – процессам кристаллизации, плавления, испарения, возгонки, десорбции, абсорбции. Экзотермическое изменение энтальпии – кристаллизации, адсорбции.

Химические процессы, свойственные указанным пикам, следующие [94]: эндотермические - соответствуют дегидратации, восстановлению в газовой атмосфере; экзотермические - соответствуют хемосорбции, окислительной деструкции, окислению в газовой атмосфере, горению, различным каталитическим реакциям. И те, и другие пики соответствуют различным видам окислительно-восстановительных реакций разложения. Реакции происходят в твердой фазе.

Важно, что экзотермический пик при 181,2 °С не сопровождается существенными изменениями массы пробы, что установлено при анализе ТГ-кривой. Остальные указанные пики отвечают процессам деструкции в исследуемом образце. По ТГ-кривой определено, что разложение пробы проходит в четыре стадии. Основная масса пробы начинает разлагаться при температуре 330,3 °С. В ходе второй стадии деструкции, масса пробы она уменьшается на 3,28 %, температура максимальной скорости данной стадии – 455,3 °С. Третья стадия характеризуется снижением массы образца на 7,13 %, максимум скорости этой стадии отмечен при температуре 538,7 °С. На четвертой стадии происходит потеря еще 6,59 % массы пробы, скорость данного процесса достигает максимального значения при температуре 597,6 °С. Остаточная масса при температуре 599,7 °С равна 82,11 %. Таким образом, при нагреве пиритных пород до 600 °С происходит

убыль массы вещества на 17,89 %, что свидетельствует о развитии окислительных процессов.

В сравнении с пробой, представленной серицит-кварцитовыми породами, где содержание серы – 3,6% (рис. 3.14), потеря массы при нагреве до температуры 600 °С составляет 5,16%, для серного колчедана потеря массы – 17,89%. Это свидетельствует о выбросе серосодержащих газов в атмосферу. Однако, резкие экзотермические пики отсутствуют – при плавном нагреве серного колчедана до заданной температуры происходит равномерный окислительный процесс без выделения тепла, согласно ДСК-кривой.

Для инициирования возникновения экзотермической реакции и определения крупности частиц сульфидной пыли, являющихся инициаторами окислительных процессов при взрыве и поддерживающих распространение пламени и горение, дальнейшие испытания были проведены с добавлением вещества катализатора - аммиачной селитры.

Для выявления влияния размера частиц пыли, проявляющих термическую активность, пробу измельчали в конусной мельнице-дробилке - ВКМД10. Затем методом ситового анализа на машине EML 200 производили отбор фракций: -40; -71+40; -100+71; -125+100 мкм.

Лабораторная проба с маркировкой СИ 19-7 представлены серным колчеданом. Пробы пород для исследований были отобраны на месторождении Новый Сибай. По результатам РФА было установлено, что в образце с маркировкой СИ 19-7, представленном серным колчеданом, среднее содержание серы составляет 42%, на основании чего пыль этого минерала отнесена к весьма склонным к окислению с последующим воспламенением в измельченном состоянии.

На рисунках 3.16-3.19 приведены кривые синхронного термического анализа для пробы серного колчедана СИ 19/7 (размер частиц – от -125+100 мкм до частиц крупностью менее 40 мкм) в смеси с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 (масс.). Синим цветом показана ДСК-кривая, зеленым - ТГ-кривая.

При анализе ДСК и ТГ кривых, учтено, что, согласно справочным значениям [95], температура плавления аммиачной селитры – 169 °С, при быстром нагреве

нитрата аммония, свыше 300 °С, он разлагается со взрывом. При нагреве смеси пробы серного-колчедана, размером частиц – -40 мкм, с аммиачной селитрой протекает ряд эндо- и экзотермических процессов.

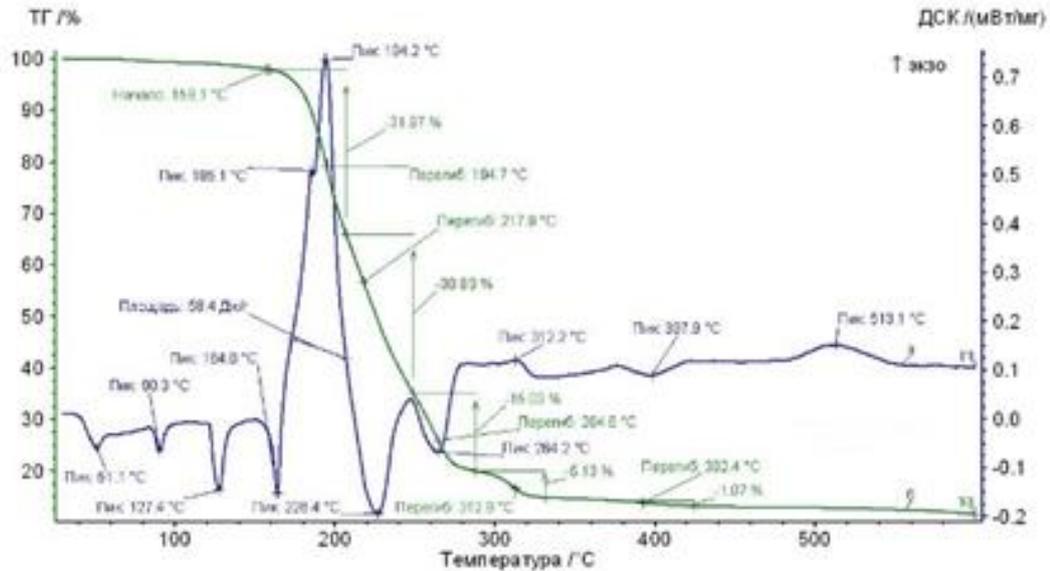


Рисунок 3.16 - Кривые синхронного термического анализа смеси пробы СИ 19/7 с аммиачной селитрой (1:9 (масс.): размер частиц – -40 мкм). На рисунке: синим цветом показаны ДСК-кривая; зеленым – ТГ-кривая

На рисунке 3.16 температура основной деструкции образца – 159,1 °С приближена к температуре разложения аммиачной селитры, разница в 10 °С объясняется наличием тонкодисперсной сульфидной фракции, усиливающей протекание экзотермической реакции. В диапазоне температур 159,1 – 217,9 °С происходит основная потеря массы, что совпадает с экзотермическим пиком при температурах 185,1 – 194,2 °С. Анализ ТГ и ДСК-кривых убедительно доказывают, что при измельчении серно-колчеданной породы до фракции -40 мкм и воздействии на нее теплового импульса происходит реакция взрывного горения. Остаточная масса образца при температуре 600° - 6,71 %.

Кривые синхронного термического анализа смеси пробы СИ 19/7 (размер частиц – -71+40 мкм) с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 (масс.) представлены на рисунке 3.17.

На ТГ-кривой начало основной реакции разложения начинается при температуре 160,7 °С, характеризующей ярко выраженный экзотермический эффект.

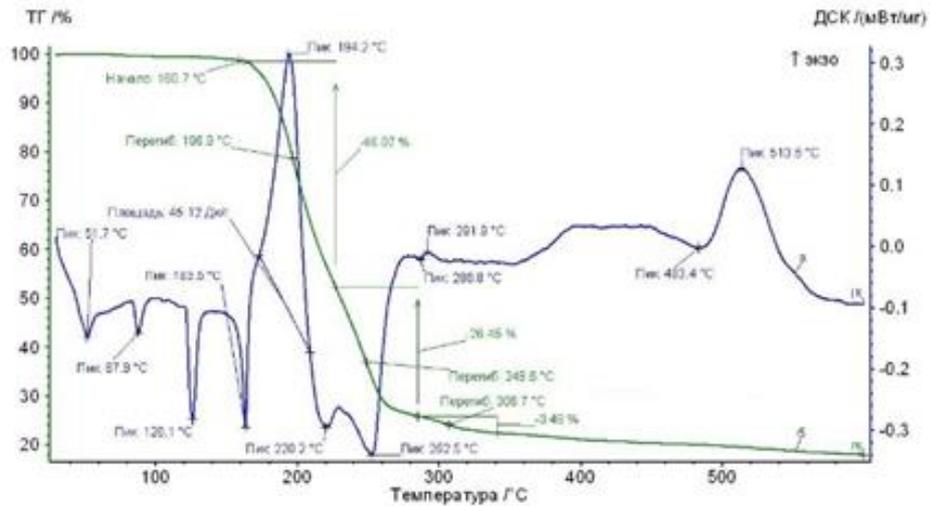


Рисунок 3.17 - Кривые синхронного термического анализа смеси пробы СИ 19/7 с аммиачной селитрой (1:9 (масс.): крупность -71+40 мкм. На рисунке синим показана ДСК-кривая; зеленым ТГ-кривая

Основная убыль массы смеси составляет 46,07 %, скорость этого процесса достигает максимума в точке перегиба соответствующего участка ТГ-кривой при температуре 196,9 °С. На ДСК-кривой наблюдается реакция с выделением тепла при температуре 194,2 °С, сопровождающаяся резкой убылью массы. К моменту окончания испытания потеря массы составила 7.82% от начальной величины.

На рисунке 3.18 приведены кривые синхронного термического анализа для смеси пробы СИ 19/7 (размер частиц – -100+71 мкм) с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 (масс.).

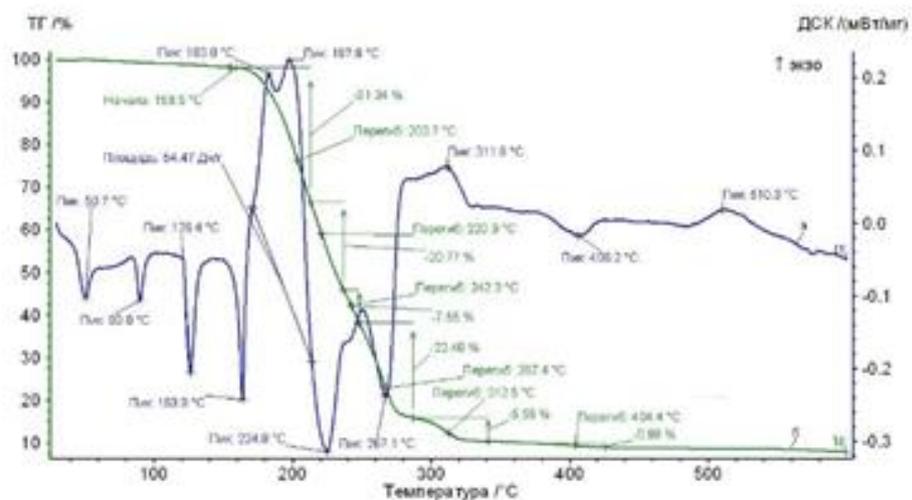


Рисунок 3.18 - Кривые синхронного термического анализа смеси пробы СИ 19/7 с аммиачной селитрой (1:9 (масс.): крупность -100+71мкм. На рисунке синим показана ДСК-кривая; зеленым ТГ-кривая

Определено, что при нагреве смеси пробы СИ 19/7 с аммиачной селитрой протекает ряд процессов с ярко выраженными тепловыми эффектами. На ТГ-кривой (см. рисунок 3.18) разложение пробы начинается при температуре 159,5 °С с основной потерей массы – 31,97 %. Скорость этого процесса достигает максимума в точке перегиба соответствующего участка ДСК-кривой, а также сопровождается ярко выраженным тепловым эффектом.

Диапазон температур основной потери массы составляет 159,5 - 203,7 °С, на ТГ-кривой совпадает с развитием экзотермической реакции при температуре 183,0 °С и 197,9 °С - на ДСК-кривой. Остаточная масса образца при температуре 599,7 °С составила 9,94 %. Таким образом, частицы сульфидной пыли крупностью - 100+71мкм продолжают сохранять термическую активность, в случае, как и при меньшей крупности -40 мкм и -71+40 мкм.

Кривые синхронного термического анализа смеси пробы серного колчедана СИ 19/7 (размер частиц – -125+100 мкм) с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 (масс.) представлены на рисунке 3.19.

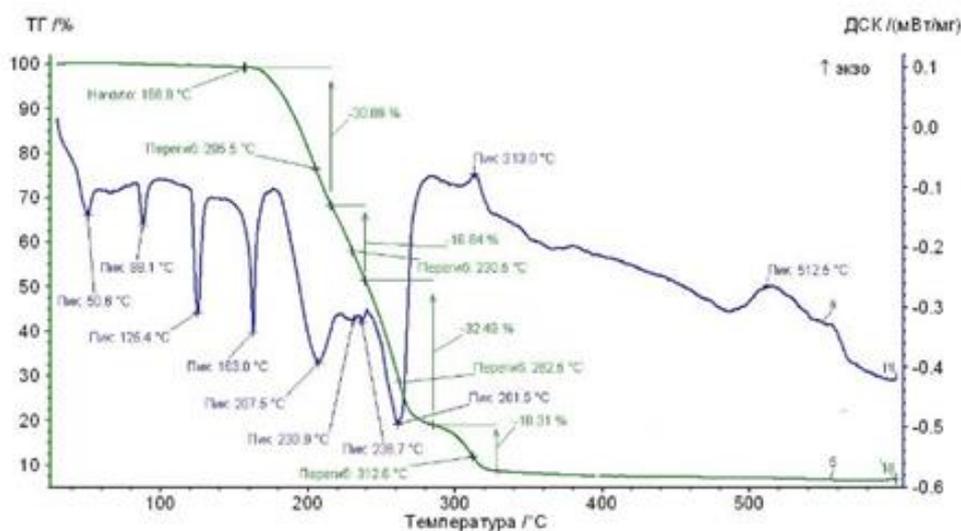


Рисунок 3.19 - Кривые синхронного термического анализа смеси пробы СИ 19/7 с аммиачной селитрой (1:9 (масс.): крупность -125+100 мкм. На рисунке синим показана ДСК-кривая; зеленым ТГ-кривая

На ТГ-кривой при температуре 158,8 °С наблюдается основная убыль массы смеси на 30,89 %. Скорость этого процесса достигает максимума в точке перегиба соответствующего участка ТГ-кривой при температуре 205,5 °С. Процесс разложения образца сопровождается рядом эндотермических пиков. В ходе

реакции экзотермический пик зафиксирован лишь при температуре 313 °С, однако, этот пик не сопровождается резкой убылью массы. К моменту выделения тепла уже произошла основная потеря массы образца - 80,02%.

В ходе эксперимента отсутствует быстропротекающая химико-физическая реакция, с резкой убылью массы и энтальпией, что говорит об отсутствии взрывного горения при крупности сульфидной пыли -125+100 мкм. К моменту окончания нагрева, она составляет 11.61 % от начальной величины.

На рисунке 3.20-а на одном графике сведены ТГ-кривые смесей проб серного колчедана СИ 19/7 различной дисперсности с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 (масс.), а на рисунке 3.20-б на одном графике сведены ДСК-кривые этих смесей.

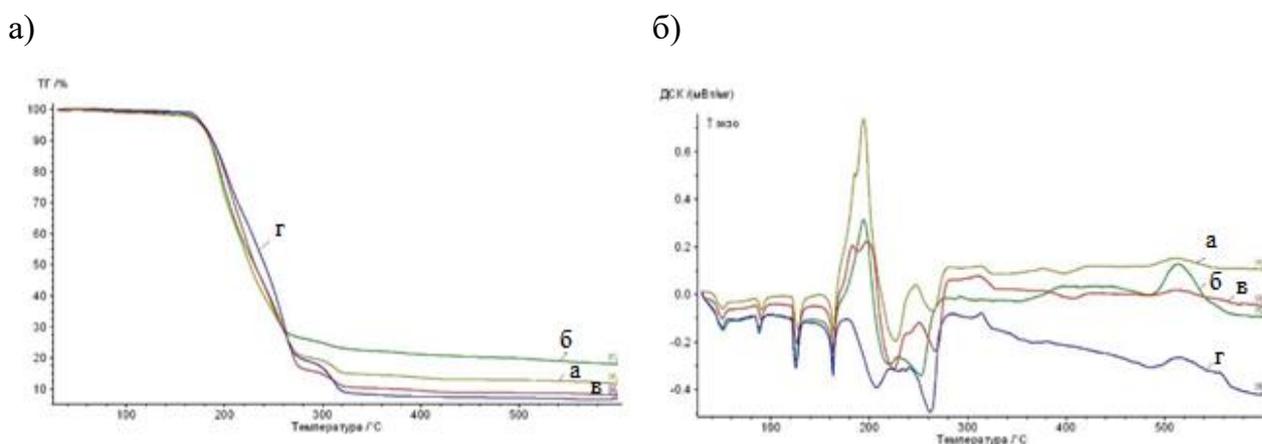


Рисунок 3.20 - Кривые синхронного термического анализа проб СИ 19/7 с аммиачной селитрой (1:9 (масс.): а) - ТГ-кривые б) - ДСК-кривые смесей: а - размер частиц - -40 мкм; б - размер частиц - -71+40 мкм; в - размер частиц - -100+71 мкм; г - размер частиц - -125+100 мкм

Анализ проб ТГ-кривых на рисунке 3.20-а показывает, что для всех образцов убыль массы происходит идентично, что объясняется добавлением аммиачной селитры, температура начала плавления которой - 169 °С. Однако присутствие пыли пирита, различных фракций ускоряет этот процесс, приводя его к разложению со взрывом в диапазоне температур 183-197,9 °С, что совпадает с диапазоном основного разложения смесей для кривых а-г (рис. 3.20-б). При крупности частиц -125+100 мкм происходит разложение аммиачной селитры с пылью сульфидных пород без выделения тепла, следовательно, такая пыль не

проявляет термической активности и становится неспособной к распространению пламени.

На рисунке 3.20 а-б для ТГ и ДСК-кривых г в ходе эксперимента отсутствует быстропротекающая химико-физическая реакция с резкой убылью массы и энтальпией, что говорит об отсутствии взрывного горения при крупности сульфидной пыли свыше 100 мкм.

В таблице 3.2 сведены результаты, полученные при синхронном термическом анализе образцов, которые расширяют представление о температуре возникновения экзотермического эффекта, а также о размере частиц сульфидной пыли, участвующей во взрыве.

Таблица 3.2 - Основные характеристики исследуемых образцов, полученные по результатам СТ-анализа

Образец, мкм	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>
Показатели	- 40	-71+40	-100+71	-125+100
Начальная температура разложения смеси, °С	159,1	160,7	159,5	158,8
Температура экзотермического эффекта (взрыва), °С	185,1 (I стадия), 194,2 (II стадия)	194,2	183,0 (I стадия), 197,9 (II стадия)	отсутствует
Энтальпия, Дж/кг	58,40	54,47	45,12	отсутствует
Потеря массы образца при экзотермической реакции, %	31,97	31,55	31,97	отсутствует
Остаточная масса образца при температуре 600 °С, %	6,71	7,82	9,94	11,61

Результаты синхронного термического анализа применительно к серноколчеданным породам месторождения Новый Сибай свидетельствуют:

1. Характерной особенностью кривых синхронного термического анализа (рис. 3.16-3.18) является наличие быстропротекающих ярко выраженных экзотермических реакций, которые во всех трех случаях, сопровождаются резкой убылью массы и выделением тепла.

2. В реакции, сопровождающейся взрывом сульфидной пыли, принимают участие частицы, размером менее 100 мкм, а не менее 150-300 мкм, как это было указано в работах авторов [92] и нормативном документе [54]. Установленный факт определяет необходимость уточнения действующих норм и

проведение дополнительных исследований, направленных на разработку и обоснование безопасных условий работы при отработке колчеданных месторождений подземным способом.

3. При нагреве образцов до температуры 600°C наблюдается закономерность – величина остаточной массы тонко измельчённой пробы прямо пропорциональна крупности её частиц и снижается с 11,61% для пробы крупностью -125+100 мкм до 6,71% для пробы крупностью менее 40 мкм. Это свидетельствует о росте интенсивности термического разложения пыли при снижении крупности частиц.

4. Теплота взрыва обратно пропорциональна крупности пыли и увеличивается с 45,12 Дж/г для фракции -100+71 мкм до 58,4 Дж/г для фракции менее 40 мкм за счет увеличения площади удельной поверхности частиц, что является характерным признаком для физико-химической реакции.

Полученные результаты позволяют сделать главный вывод о том, что склонность сульфидной пыли к взрывоопасности повышается с увеличением доли мелких фракций по экспоненциальной зависимости.

Для подтверждения рассматриваемой концепции выполнены аналогичные исследования для медно-цинковой руды (рис. 3.21 а-г).

На рисунке 3.21 а-г приведены кривые синхронного термического анализа для смеси пробы медно-цинковых руд (размер частиц – от -125+100 мкм до частиц крупностью -40 мм) с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 (масс.).

Объект исследования – медно-цинковая руда месторождение Новый Сибай, содержание серы – 37,2% по данным РФА. Маркировка пробы – СИ 19/3. Испытания проведены в идентичных условиях.

Для медно-цинковых руд с высоким содержанием серы наблюдается схожее поведение пыли различного дисперсного состава, как и для образцов серного колчедана. Так, для сульфидной пыли, крупностью -40, -71+40, -100+71 (рис. 3.21 а-в), на ДСК-кривых четко прослеживается протекание экзотермической реакции в диапазоне температур 189,9 – 217,5°C, с резким уменьшением массы образцов и энтальпией.

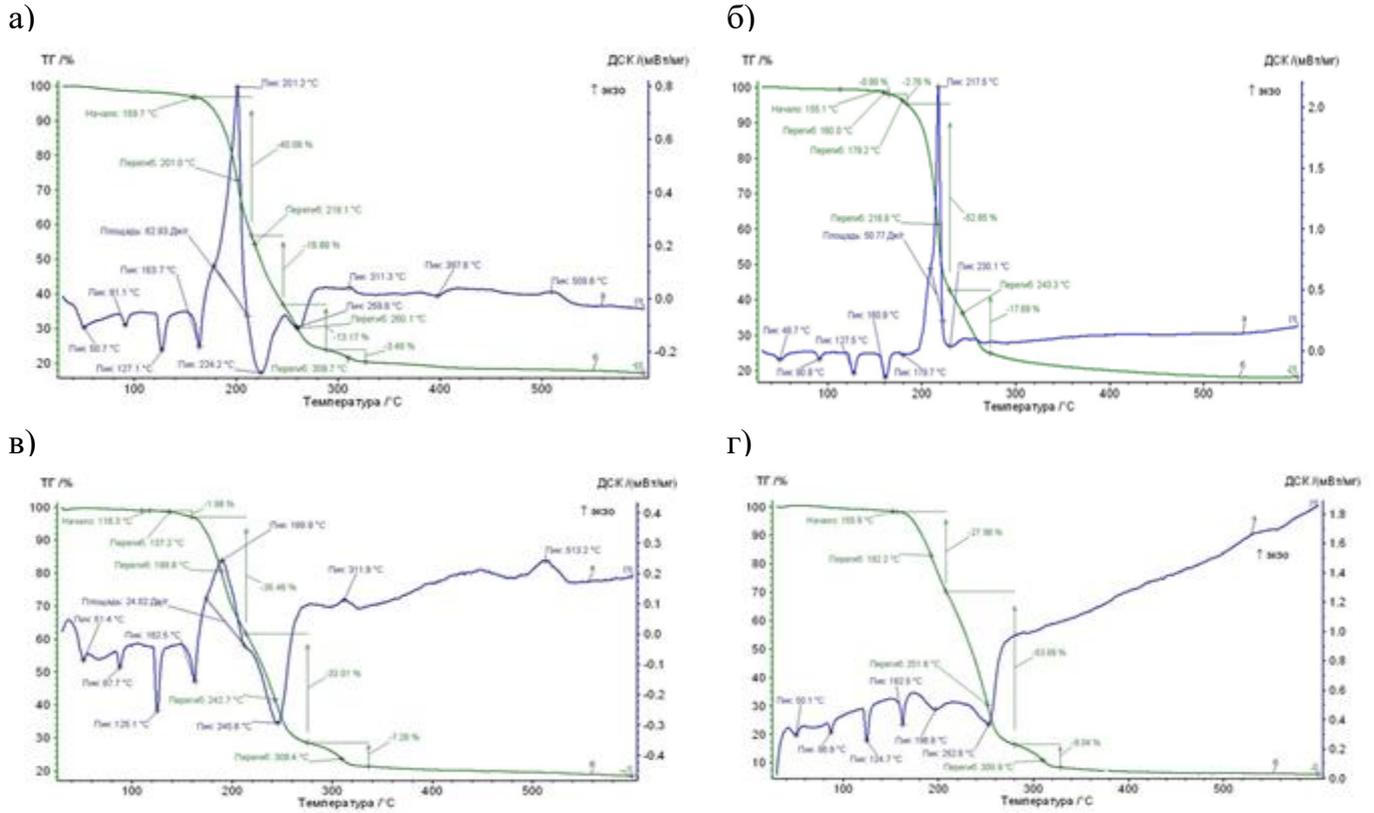


Рисунок 3.21 - Кривые синхронного термического анализа смеси пробы СИ 19/3 с аммиачной селитрой (1:9 (масс.) размер частиц: а) -40 мкм; б) -71+40 мкм; в) -100+71 мкм; г) -125+100 мкм. На рисунках синим показана ДСК-кривая; зеленым ТГ-кривая.

Для обобщённого анализа полученных результатов на рисунке 3.22-а на одном графике сведены ТГ-кривые смесей проб СИ 19/3 различной дисперсности с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 (масс.), а на рисунке 3.22-б на одном графике сведены ДСК-кривые этих смесей.

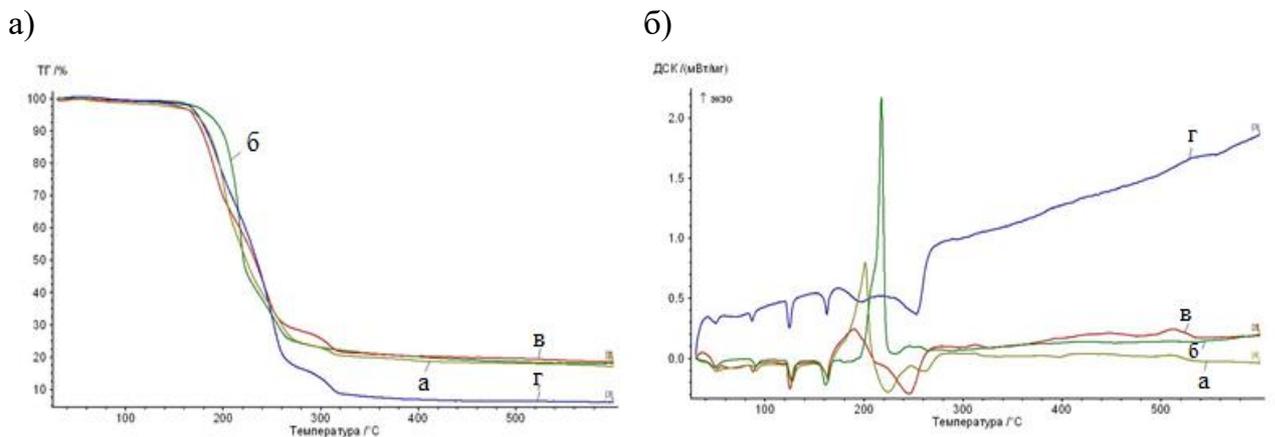


Рисунок 3.22 - Кривые синхронного термического анализа проб СИ 19/3 с аммиачной селитрой (1:9 (масс.): а) - ТГ-кривые смесей, б) - ДСК-кривые смесей: а) - размер частиц - -40 мкм; б) - размер частиц - -71+40 мкм; в) - размер частиц - -100+71 мкм; г) - размер частиц - -125+100 мкм.

На рисунке 3.21-г положение ДСК-кривой характеризует протекание эндотермической реакции до температуры 252,6°C. После чего монотонное протекание экзотермической реакции свидетельствует о плавлении и разложении образца. Характер уменьшения массы образца на ТГ-кривой г (рис. 3.22-а) идентичен при температурах разложения образцов а-в, однако, рассматриваемая реакция не сопровождается резкими экзотермическими пиками с выделением тепла.

Данный спектр исследований необходим для оценки возможности инициации процесса горения сульфидов в присутствии ВВ на основе аммиачных составляющих различной исходной крупности в смеси с аммиачной селитрой в соотношении 9:1.

В таблице 3.3 сведены результаты, СТА проб медно-цинковой руды СИ 19/3 в измельченном состоянии.

Таблица 3.3 - Основные характеристики исследуемых образцов медно-цинковой руды (маркировка СИ 19/3), полученные по результатам СТА

Образец, мкм	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>
Показатели	- 40	-71+40	-100+71	-125+100
Начальная температура разложения смеси, °С	159,7	155,1	118,3	155,9
Температура экзотермического эффекта (взрыва), °С	201,2	217,5	189,9	отсутствует
Энтальпия, Дж/кг	62,93	50,7	24,02	отсутствует
Потеря массы образца при экзотермической реакции, %	40,06	52,65	35,46	отсутствует
Остаточная масса образца при температуре 600 °С, %	17,09	18,23	18,42	6,08

Полученные результаты СТА позволили определить показатели взрывоопасности сульфидной пыли, а также подтверждают выводы, сделанные выше:

- образцы высоко сульфидной медно-цинковой пыли (проба СИ 19/3) и пыли серного колчедана (СИ 19/7) термически активны при крупности менее 100 мкм. В диапазоне крупности частиц -125+100 мкм и более отсутствует

быстропротекающая химическая реакция, резким выделением тепла и потерей массы;

- изучение серицит-кварцитовых пород (проба СИ19/4) позволило оценить способность к возникновению развития окислительных реакций, а также уточнить, что такие породы в массиве являются естественным экраном, предотвращающем горение, а в измельченном состоянии при перемешивании с пылью сульфидных минералов способствуют снижению концентрации серы, тем самым предотвращая пылевзрывоопасность;

- установлено, что смеси проб с аммиачной селитрой начинают разлагаться при более низких температурах по сравнению с чистыми пробами. В целом для всех исследуемых проб руд установлено, что контакт ВВ на основе аммиачной селитры в массивах колчеданных руд и пород может являться инициатором процесса горения при нагреве образцов в диапазоне температур 118-200 °С

- пылевые частицы сульфидов, размером более 100 мкм, не являются термически активными; при меньшем размере частиц склонность их к взрывоопасности повышается с увеличением доли мелких фракций по экспоненциальной зависимости.

3.3. Определение показателей взрывоопасности пыли, формирующейся в ходе подземных горных работ золото-сурьмяного месторождения Сентачан

Целью исследований являлась оценка взрывоопасности пыли, формирующейся в ходе подземных горных работ для безопасного вовлечения в отработку балансовых запасов горизонтов +372м и +422м, а также для доработки балансовых запасов горизонте +272м рудного тела №2 и с перспективой вовлечения в разработку рудных тел №1 и №2а.

Достижение поставленной цели основывалось на решении следующих задач:

- геолого-структурная оценка минерального состава проб руды и вмещающих пород;

- оценка возможности возникновения взрывоопасного сульфидного облака пыли;
- обоснование условий взрывобезопасного производства буровзрывных работ;
- разработка технологических мероприятий, предотвращающих взрывоопасность с учетом выбора вида, применяемого ВВ и средств взрывания, технологии ведения подготовительно-нарезных и очистных работ.

Для лабораторных исследований использовались пробы руды золото-сурьмяного месторождения Сентачан, а также пыль, формирующаяся в ходе ведения на нем подземных горных работ.

Проба Т-1 отобрана из эксплуатационного блока 503 а, гор. 272 м, рудного тела № 2 из массива замагазинированной товарной руды текущей добычи из орта – заезд № 2. Материал пробы представлен обломками, размером 1-10 см, кварц-антимонитовой руды, алевролитов с прожилками кварц-антимонитового состава и разубоживающих вмещающих пород, представленных алевролитами и алевропесчаниками.

Первоочередным при оценке взрывчатости сульфидной пыли явились опережающие минералогические исследования, сконцентрированные на изучении текстурно-структурных особенностей руд, минерального состава, факторов, определяющих поведение рудных минералов в процессе добычи. Данный блок исследований приведен в 3.1.

Результаты ранее выполненных исследований кварц-антимонитовой руды продемонстрировали значительную изменчивость содержания серы пробах фракций различной крупности. Так для фракции -40 мкм содержание серы на 2,9 % выше среднего по образцу, что составляет 28,34 % в относительном выражении. При этом содержание серы во фракциях -40 мкм и -125+100 мкм отличаются на 4,48 %, что составляет 43,56% относительно среднего содержания по образцу.

Краткая геолого-структурная оценка серицит-кварцитово́й руды, а также результаты РФА приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Характеристика исследованных образцов серицит-кварцитовой руды месторождения Сентачан

Наименование	Содержание серы, %	Текстурно-структурные особенности сложения
Т-1 – обломки кварц антимонитовой руды	$S_{\text{сред.}} = 10,3$ $S_{\text{max}} = 13,22$ $S_{\text{min}} = 8,73$	Руды сложены мелкозернистым антимонитом, структура гранобластовая размер зерен 10–50 мкм. В кварце и антимоните встречается арсенопирит. Размер выделений арсенопирита 0-120 мкм.

Принимая за критерий взрывоопасности содержание серы, результаты анализов, свидетельствуют о том, что пробы руды Т-1 не склонны к образованию в атмосфере рудника взрывоопасного облака сульфидной пыли, т.к. являются убогосульфидными. Однако изменчивое содержание серы в зависимости фракционного состава пробы определили необходимость проведения дополнительных исследований.

Следует указать, что по фактору содержания серы, руды месторождения Сентачан являются непожароопасными, не склонными к самовозгоранию, в том числе в замагазинированном состоянии. Рудничная пыль месторождения не является взрывоопасной.

Дальнейшая методика проведения лабораторных исследований базировалась на определении склонности рудничной пыли месторождения Сентачан к взрывопожароопасности. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89 [33] Испытание на самовозгорание проводили по п.4.9.

Одними из показателей пожарной опасности твердых веществ и материалов являются температура самовоспламенения. Согласно ГОСТ 12.1.044-2018 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения», самовоспламенение – это явление резкого увеличения скорости экзотермических реакций окисления, приводящее к возникновению горения и/или взрыва. При исследовании динамики развития экзотермической реакции, температура самовоспламенения веществ и материалов является важной оценочной характеристикой, позволяющей сделать выводы об их способности к возгоранию и распространению горения при воздействии высокой температур или источника окисления.

Очевидно, что чем мельче крупность частиц сульфидной пыли и чем ее будет больше, тем выше вероятность ее самовоспламенения. В процесс пробоподготовки осуществляли: измельчение руды в лабораторной щековой дробилке до фракции -5-0 мм, а также измельчение до крупности -1-0 мм в лабораторной конусной дробилке ВКМД10. Подготовка фракции, крупностью -40 мкм, проводилась с помощью просеивающей машины EML 200.

Для исследования процессов окисления сульфидов рудных фракций, отлагаемых на стенках и почве горной выработки, рабочих органах горного оборудования с определением вероятности возникновения очагов нагрева различной температуры применялся обжиг в печи Н 60 Е с терморегулятором В130. Далее из усредненного материала отбирались навески, массой $3,0 \text{ г} \pm 0,1 \text{ г}$ и помещались в керамический тигель. Содержимое тигля помещали в разогретую печь в соответствие с заданным температурным режимом. Для каждой пробы испытания проводили 3 раза.

Рабочую камеру нагревали до температуры 500°C . После установления в рабочей камере стационарного температурного режима, из камеры извлекали контейнер, заполняли его образцом за время не более 15 с и помещали внутрь камеры. Контейнер с образцом выдерживали 20 мин. Следующее испытание проводили при температурах 550 и 600°C .

На рисунке 3.23 представлены образцы пробы Т-1 в измельченном состоянии (отсев фракции -40 мкм) до нагревания в печи и после обжига.

а)



б)



Рисунок 3.23 – Образцы кварц-антимонитовой руды: а) до нагрева в печи; б) после обжига

По итогам первой серии испытаний для всех проб пород и руды месторождения Сентачан не было ни разу отмечено следов воспламенения на стенках тиглей и дымообразования. Зафиксировано, что во всем диапазоне температур проведенных испытаний самовоспламенение руд и пород отсутствует, в частности, ни разу не было отмечено наличие дымообразования, а также следов самовоспламенения на стенках тиглей и в самих пробах.

Нагрев образцов в печи до заданных температур при проверке на склонность к взрывопожароопасности позволяет заключить, что руды и породы месторождения Сентачан не склонны к самовоспламенению при кратковременном воздействии на них высоких температур (до 600°C).

Для изучения воздействия более высоких температур на образцы, после достижения температуры 600 °С и оценке состояния образцов, температура печи была увеличена до 1000 °С, при этом образец непрерывно находился в печи. Внешний вид образца после нагрева до температуры 1000 °С изображен на рисунке 3.23-б. Как видно, следы воспламенения отсутствуют.

Однако, присутствие в рудных минералах сульфидной серы предопределило проведение специальных исследований на взрываемость сульфидной пыли, выполненных применительно к представленным на исследования пробам руды и пыли месторождения Сентачан.

Для этого, все пробы горных пород подвергаются экспериментальным исследованиям на предмет оценки термической активности различных классов крупности.

Пробоподготовка проводилась по п.2.4.

Объекты исследований - руда месторождения Сентачан в виде мелкодисперсных порошков, представленных классами крупности: – -40; -71+40; -100+71; -125+100 мкм, а также их смеси с аммиачной селитрой в соотношении 1:9.

При проведении лабораторных исследований было предусмотрено изучение взрывчатых свойств образцов в измельченном состоянии. При разделении образцов на фракции – от -125 мкм до -40 мкм, руководствовались гипотезой, что чем мельче пыль, тем она химически более активна, взрывоопасна и тем меньше необходима ее концентрация для возникновения экзотермической реакции.

Определение взрывоопасности пыли, формирующейся в ходе подземных горных работ при разработке сульфидных месторождений проводилось в 2 этапа: на первом этапе проводилось исследование характера горения вмещающих пород для определения их термической активности; на втором – с применением вещества катализатора с целью ускорения протекания реакции выявлялась термическая активность фракций.

На рисунке 3.24 представлены кривые синхронного термического анализа кварц-антимонитовой руды, отсев фракции -40 мкм.

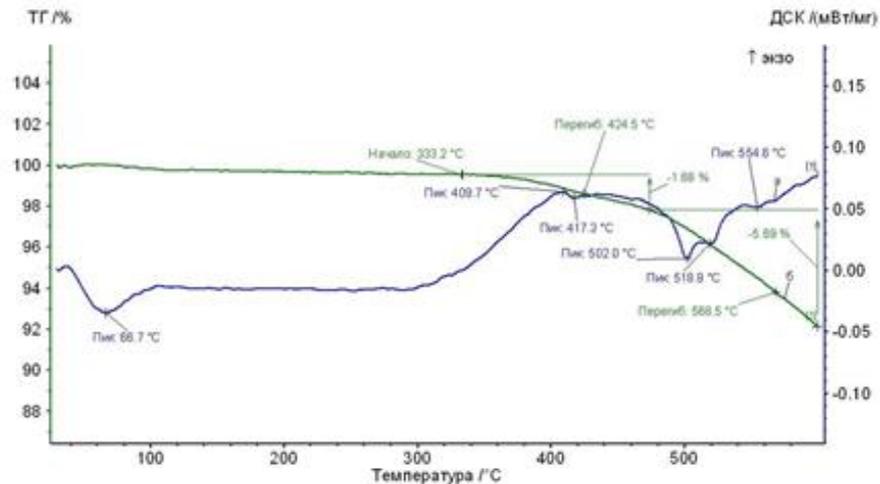


Рисунок 3.24 – Кривые синхронного термического анализа пробы Т-1: На рисунке: синим цветом показаны ДСК-кривая; зеленым – ТГ-кривая

Далее приведены основные результаты исследования характера разложения кварц-антимонитовой руды при нагревании в заданном режиме изменения температур. Среднее содержание S в образце – 10,3%. Как правило на практике, такие породы не являются инициаторами окислительных процессов и не поддерживают горение.

На ДСК-кривой явно видны, пять эндотермических пиков и один экзотермический. Эндотермический пик на ДСК-кривой при температуре 66,7 °C не сопровождается существенным изменением массы пробы. При такой температуре происходит удаление межпоровой гравитационно-связанной влаги. Остальные указанные пики, в том числе и экзотермический пик при 409,7, °C отвечают превращениям, происходящим в образце при разложении. Данная реакция протекала аналогично реакции нагрева кварц-серицитовых пород

месторождения Новый Сибай. Остаточная масса при температуре 599,7 °С составила 92,15 %. Вместе с тем, монотонная убыль массы – не более 2-6 % на каждые 10⁰С в течение всего времени разложения пробы, свидетельствует об отсутствии риска вспышки (взрыва). Дальнейшая оценка характеристик термической активности сульфидной пыли проводилась в соответствии с Программой-методикой п. 2.4.

Кривые синхронного термического анализа для смеси пробы кварц-антимонитовой руды (Т-1) с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 (масс.) приведены на рисунке 3.25.

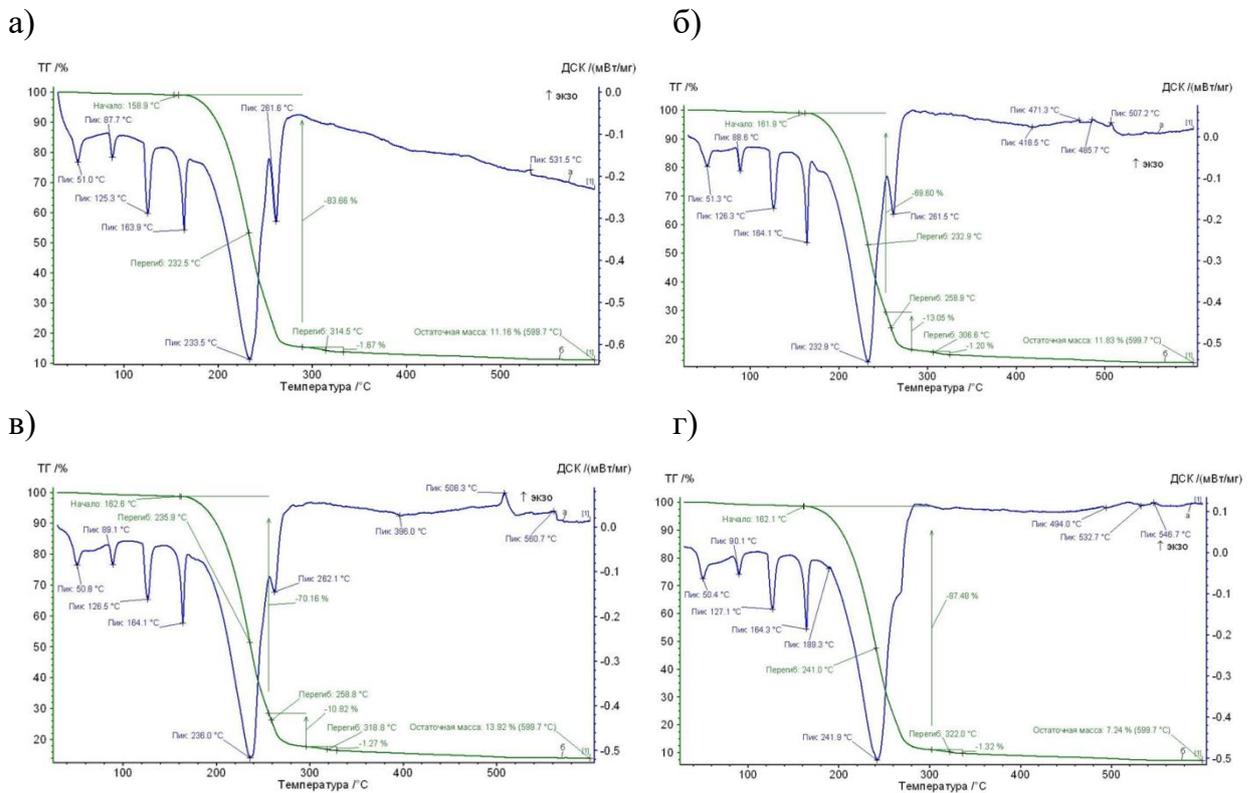


Рисунок 3.25 – Кривые синхронного термического анализа смеси пробы Т-1 с аммиачной селитрой (1:9 (масс.): а) - размер частиц – менее 40 мкм; б) – крупность -71+40 мкм; в) – крупность -100+71 мкм; г) – крупность -125+100 мм. На рисунке синим показана ДСК-кривая; зеленым ТГ-кривая

На рисунке 3.25 а-г ДСК-кривые всех классов крупности отражают протекание эндотермической реакции. В диапазоне температур 158,9 – 162,6°С наблюдается начало основной деструкции смеси. Потеря массы образца при поглощении тепла на рисунке 3.25-а составила 83,66%; 3.31-б – 69,60%; 3.31-в –

70,16; 3.31-г – 87,48, что соответствует температуре плавления нитрата аммония, процессы энтальпии при этом отсутствуют.

Присутствие серицит-кварцитовых пород, со средним содержанием серы – 10,3%, не активизирует развитие окислительных процессов, переходящих во взрывное горение и не поддерживает развитие экзотермической реакции.

Количественная оценка СТА серицит-кварцовой руды месторождения Сентачан приведена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Основные характеристики исследуемых образцов серицит-кварцовой руды в смеси с аммиачной селитрой, полученные по результатам СТА

Образец, мкм	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>
Показатели	- 40	-71+40	-100+71	-125+100
Начальная температура разложения смеси, °С	158,9	161,9	162,6	162,1
Температура экзотермического эффекта (взрыва), °С	отсутствует	отсутствует	отсутствует	отсутствует
Энтальпия, Дж/кг	отсутствует	отсутствует	отсутствует	отсутствует
Потеря массы образца при эндотермической реакции, %	83,66	69,6	70,16	87,48
Остаточная масса образца при температуре 600 °С, %	11,16	11,83	13,92	7,24

Убогосульфидные кварц-антимонитовые руды в диапазоне крупности от - 125+0 мкм не оказывают экзотермического эффекта, не являются инициатором нагрева и не поддерживают взрывное горение. Результаты испытания этих образцов методом СТА, также могут быть использованы с целью оценки совместимости руд и пород, а также рудничной пыли с используемым на буровзрывных работах типом ВВ.

Выполненный комплекс исследований по изучению взрывоопасности кварц-антимонитовой руды месторождения Сентачан позволил сделать следующие выводы:

1. Несмотря на изменчивость содержания серы в различных фракциях от 8,73 до 13,22 % в результате первичного дробления, пробы кварц-антимонитовой руды Т-1 являются непожароопасными, не склонными к самовозгоранию, содержат

серу в пределах 14%, при кратковременном нагреве образцов не происходит самовоспламенения и дымообразования.

2. При нагреве серицит-кварцитовых руд, даже с веществом катализатором – аммиачной селитрой, при крупности частиц пыли: -40; -71+40; -100+71; -125+100 мкм вероятность возникновения экзотермической реакции отсутствует.

3. Руды месторождения Сентачан являются совместимыми с применяемым на руднике ВВ – Аммонитом №6ЖВ. Установлена полная безопасность применения этого типа ВВ в диапазоне температур воспламенения главного индикатора этого ВВ аммиачной селитры (плавления – 169°C; вспышки зафиксированы при времени задержки 60 с в интервале температуры 180-190°C). Исключено разложение аммиачной селитры в присутствии сульфидосодержащихся рудных шламов, буровой мелочи (испарения и фонтанирования, вспышки заряженных аммиачно-селитренных ВВ шпуров и скважин).

3.4. Оценка пород и руд кобальт-медно-никелевого месторождения Шануч, а также взрывоопасности пыли, формирующейся в ходе подземных горных работ

Целью исследований явилась оценка степени взрывопожароопасности руд и вмещающих пород на месторождении Шануч. В процессе выполнения лабораторных исследований учитывались следующие факторы: месторождение Шануч добывает медно-никелевые руды; самовоспламенение и взрывы сульфидной пыли ранее зафиксированы не были; руды месторождения представлены сульфидами никеля, меди, железа, а содержание в них серы колеблется в широких пределах: сплошные руды характеризуются относительно высоким содержанием серы до 35-40%, вкрапленные – более низким, в пределах 8-14%; тип применяемых на руднике ВВ – Аммонит 6ЖВ и Граммонит 21М.

Для проведения лабораторных исследований использовалась представительная проба руды, отобранная на месторождении Шануч, ее характеристика приведена ниже:

- проба ТП №40/3 - рудный материал представлен халькопирит-пирротин-пентландитами рудного тела №1. Место отбора - Северо-Западная стенка БДШ-4 гор. 300 м. ПК-2.

В условиях проведения эксперимента исследована выше описанная проба ТП №40/3 (см. рис. 3.11), отобранная на месторождении Шануч и представленная гранито-гнейсами, габбро и вкрапленными рудами.

В таблице 3.6 сведена краткая геолого-структурная оценка образца руды месторождения Шануч.

Таблица 3.6 - Характеристика исследованных образцов серицит-кварцитовой руды месторождения Шануч.

Наименование	Содержание серы, %	Текстурно-структурные особенности сложения
ТП №40/3 - халькопирит-пирротин-пентландитами	$S_{\text{сред.}} = 13,56$ $S_{\text{max}} = 16,67$ $S_{\text{min}} = 15$	Руда представлена разнообразным минеральным составом: кварц, амфибол полевоый шпат, актинолит, пирит, халькопирит, виоларит. Размер зерен меняется в широких пределах от 20 до 200 мкм.

Результаты геолого-минералогической оценки показали наличие эффекта перераспределения содержания серы между фракциями руды при первичном ее дроблении. Содержание серы во фракциях -40 мкм и -125+100 мкм отличаются на 3,11 %, что составляет 20,7 % относительно среднего содержания по образцу.

Согласно программе-методике сульфидную пыль месторождения Шануч подвергли оценке на склонность к взрывопожароопасности. Результаты лабораторных анализов свидетельствуют о том, что медно-никелевая руда содержит серу в пределах 17% и поэтому была проверена на склонность к взрывопожароопасности дополнительными методами.

Согласно предложенной методике, дальнейшие исследования предполагают определение температуры самовоспламенения образцов руды в печи. По итогам первой серии испытаний для всех проб пород и руды месторождения Шануч не отмечено следов воспламенения на стенках тиглей и дымообразования. Нагрев образцов в печи в диапазоне температур 500-600°C при проверке на склонность к взрывопожароопасности позволил заключить, что руды и породы месторождения Шануч не склонны к самовоспламенению при кратковременном воздействии на них высоких температур.

В соответствии с методикой проведения исследований, для изучения динамики воспламенения и горения сульфидных руд месторождения Шануч применялся метод СТА. Как показал анализ исследований убогосульфидной серицит-кварцовой руды месторождения Сентачан, а также результаты эксперимента высокосульфидных проб пород СИ 19/7 и СИ 19/3 в смеси с аммиачной селитрой температура экзотермического эффекта с потерей массы и выделением большого количества тепла происходит в диапазоне температур 170 °С. Для совершенствования метода определения термически активных образцов сульфидных руд скорректирован режим нагрева - сократить нагрев руд и пород до 300°С, а также увеличить скорость нагрева с 10°С/мин. до 20°С/мин.

На рисунке 3.26 представлены кривые синхронного термического анализа для пробы медно-никелевой руды ТП 40/3 вне контакта с ВВ.

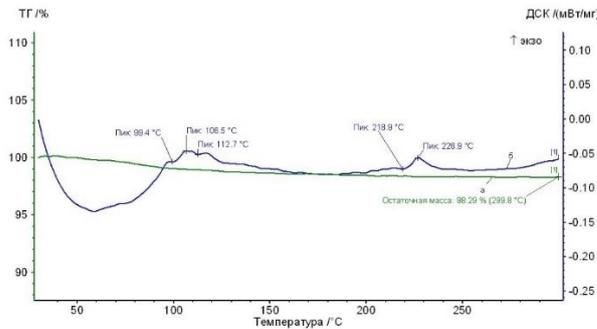


Рисунок 3.26 – Кривые синхронного термического анализа медно-никелевой руды пробы ТП 40/3: а – ТГ-кривая (зеленым); б – ДСК-кривая (синим)

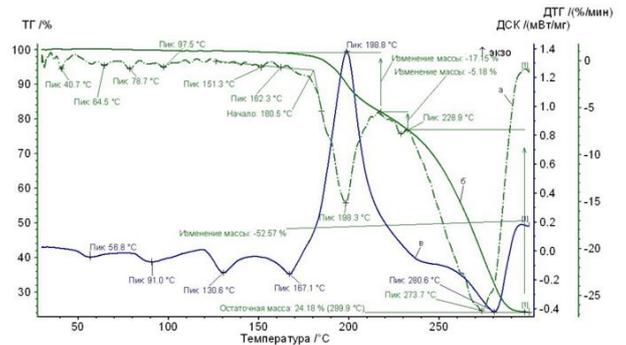


Рисунок 3.27 – Кривые синхронного термического анализа для смеси пробы ТП 40/3 с аммиачной селитрой (1:9): а – ДТГ-кривая; б – ТГ-кривая; в – ДСК-кривая

При нагревании пробы ТП40/3 до 300 °С не происходит существенных изменений. На ДСК-кривой присутствует лишь ряд эндо- и экзотермических пиков, характеризующихся малыми значениями тепловых эффектов. Остаточная масса образца при температуре около 300 °С составляет для пробы ТП 40/3 – 98,29 %. Значения тепловых эффектов, протекающих при нагреве – незначительны. Таким образом, убогосульфидная пыль медно-никелевого месторождения при попадании на нагретые рабочие органы силового оборудования, а также неизолированные кабели не может стать инициатором возникновения тепловой реакции.

Кривые синхронного термического анализа для смеси пробы медно-никелевой руды с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 приведены на рисунке 3.27. Крупность измельчения пробы – 100% класса - 40 мкм.

При нагреве смеси пробы ТП 40/3 с аммиачной селитрой, в диапазоне температуры до 198,8 °С наблюдаются лишь незначительные изменения. Разложение основной массы образца начинается при нагреве до температуры 198,3 °С, происходит с основной потерей массы исследуемого образца - 17,15 %.

При этом данная стадия разложения сопровождается интенсивным выделением тепла (экзотермический пик на ДСК-кривой при 198,8 °С). Остаточная масса образца при температуре 299,9 °С составила 24,18 %. Возникновение экзотермической реакции, сопровождающейся выделением тепла потерей массы за короткий промежуток времени в пробе со средним содержанием серы 13,56%, свидетельствует о несоответствии режима и скорости нагрева реальным условиям. Поскольку при содержании серы в рудах и породах вероятность возникновения взрыва отсутствует, то в ходе использования ТГ-анализа для определения термической активности сульфидной пыли оптимальным режимом и скоростью нагрева является температура нагрева до 600°С, скорость нагрева должна составлять не более 10°С/мин. Для кварц-антимонитовой руды месторождения Сентачан, описание которой представлено в 3.4, при идентичном содержании серы в образце – 10,3 %, но при скорости нагрева 10°С/мин. для всех классов крупности частиц происходят эндотермические реакции даже в смеси с веществом катализатором – аммиачной селитрой.

На рисунке 3.28 кривые синхронного термического анализа ДСК и ТГ для смесей проб ТП40/3 для различных классов крупности с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 сведены на одном графике.

Для классов крупности -40 мкм (кривые а, е), -71+40 (кривые б, д) отмечено развитие экзотермической реакции с резкой убылью массы. Для частиц сульфидной пыли, крупностью -100+71 мкм, происходит эндотермическая реакция.

Принимая за критерий взрывоопасности содержание серы в руде на более 35% и учитывая результаты химического анализа на серу, доказано, что руды и породы месторождения Шануч невзрывоопасны.

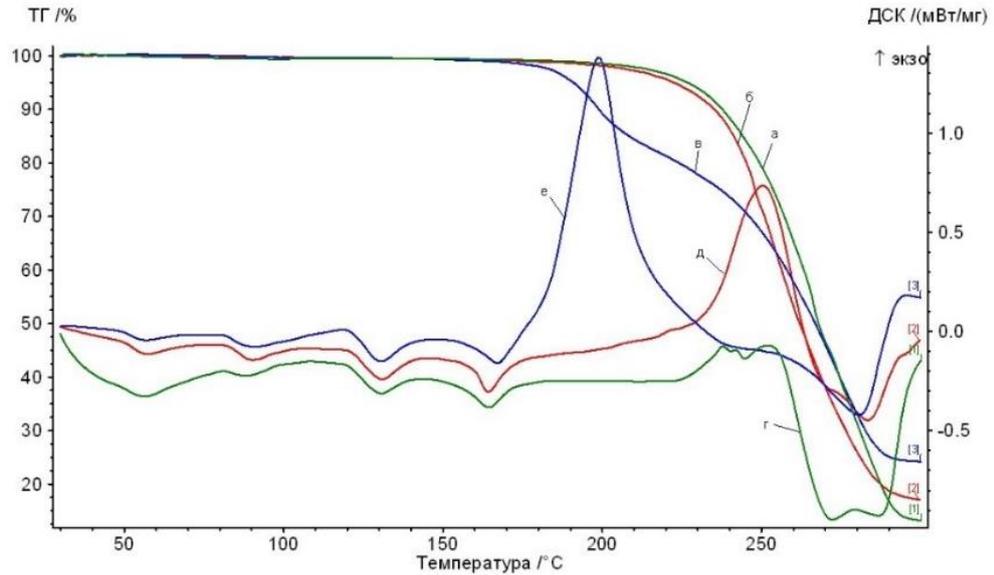


Рисунок 3.28 – Кривые синхронного термического анализа для смесей проб ТП40/3 с аммиачной селитрой (1:9): а - ТГ-кривая, г – ДСК-кривая, размер частиц - 100+71 мкм; б – ТГ-кривая, д – ДСК-кривая, размер частиц -71+40 мкм; в – ТГ-кривая, е - ДСК-кривая, размер частиц -40 мкм.

Доказано, что при нагреве проб серицит-кварцитовых руд ТП №40/3 с аммиачной селитрой пик потери массы приходится на температуру 198,3°C, что лежит за пределами взрываемости селитры, саморазогрева массива и взрывчатости сульфидной пыли.

Выполненный комплекс лабораторных исследований с высокой достоверностью позволяет заключить, что при отработке руд и горных пород месторождения Шануч применения специальных мероприятий, направленных на снижение риска взрывопожаробезопасности пыли, не требуется.

3.5. Алгоритм оценки склонности сульфидной пыли к взрывоопасности при подземной разработке месторождений колчеданных руд

Согласно последней редакции основного нормативного документа по обеспечению безопасного ведения горных работ – ФНиП «ПБ при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [137], где пункт 166 гласит о том, что организации, эксплуатирующие шахты по отработке месторождений колчеданных руд, должны иметь заключение научной организации, содержащее сведения об опасности взрыва (воспламенения) серной или сульфидной пыли. Очевидно, что при эксплуатации рудника, необходимо в индивидуальном порядке

производить оценочные, лабораторные и исследовательские работы по изучению взрывоопасности сульфидной пыли. Однако, не ясен объем, порядок и последовательность проведения таких работ. То есть процесс изучения взрывоопасности пыли колчеданных руд не регламентирован на законодательном уровне. Для устранения, рассмотренного выше недостатка и правильной оценки пылевой обстановки при разработке месторождений колчеданных руд, а также при оценке эффективности применения противопылевых мероприятий на рудниках необходимо устранить недостатки, присущие применяемым методам оценки. Поэтому, предложенная методика по изучению взрывоопасности сульфидной пыли, включающая комплексирование лабораторных методов, в том числе с предложенной в ней авторской методикой, является актуальной.

Схематически последовательность алгоритма проведения исследований по оценке склонности сульфидной пыли к взрывоопасности приведена на рисунке 3.29, а практические результаты в п.3.1-3.5.

Основными технологическими операциями при проведении исследований является:

- подготовка образца – изготовление шлихов, измельчение образцов руд и пород до рабочей фракции;
- рассев образцов руд и пород, представленных на исследование с получением различных классов крупности в ходе первичной дезинтеграции с оценкой гранулометрического состава формируемых пылевых частиц в диапазоне от -40 до 250 мкм;
- лабораторные исследования по определению термической активности, температуры самовоспламенения, изучению содержания серы в различных классах крупности в соответствии с предложенной авторской методикой (см. п. 2.4).

Результаты выполненных исследований по оценке склонности сульфидной пыли к взрывоопасности представляются определенным набором данных, полученных при выполнении последовательных действий, на базе которых были получены новые знания о закономерностях распределения содержания серы в различных классах крупности частиц пыли с оценкой их термической активности. Методика оценки склонности сульфидной пыли к взрывоопасности апробирована

на ряде месторождений колчеданных руд – Шануч, Сентачан, Сибайское и доказала свою работоспособность.



Рисунок 3.29 – Алгоритм проведения оценки склонности сульфидной пыли к взрывоопасности

Важнейшим условием реализации программы-методике изучения факторов и процессов развития взрывов сульфидной пыли, приведенной в 2.4, 3.1-3.5, является наличие регламентированного технического порядка по осуществлению своевременного контроля и оценки рисков возникновения взрыва сульфидной пыли. Для эффективного функционирования системы мониторинга состояния безопасности на производственных предприятиях необходима разработка системы

комплексных наблюдений за состоянием производственного объекта, позволяющие всесторонне оценить уровень опасности предприятия.

Концептуально, оценка склонности сульфидной пыли к возникновению взрывоопасной ситуации должна базироваться на проведении лабораторных исследований по изучению геологических, структурных, химических и физических свойствах пыли сульфидных минералов и на контроле описанных выше горно-технических факторов взрывоопасности.

Основываясь на методических основах пылевзрывобезопасности, оценке технологических решений по борьбе со взрывами в соответствии с особенностями механизма формирования и распространения взрывной волны, в соответствии с программой-методикой оценки руд, пород и пыли колчеданных месторождений разработана блок-схема оценки склонности сульфидной пыли к взрывоопасности. (рис. 3.30).

Первым этапом является проведение геолого-минералогической оценки состава представительных проб руд и пород. В случае, если зафиксировано отсутствие сульфидных, серосодержащих минералов, или они обнаружены в количестве – менее 18%, достаточно провести измерение содержания серы, в протоколе указать отрицательный риск возникновения взрыва сульфидной пыли.

В случае выявления сульфидных минералов, содержащих серу в количестве более 18 % проводят изучение текстурно-структурных особенностей строения проб, представленных на исследование, минерала.

На данном этапе оценки ключевыми параметрами являются оценка распределения содержания серы по классам крупности, что в свою очередь, зависит от:

- хрупкости и твердости пород: если сульфидные минералы, слагающие породу, представлены хрупкими минералами, а также минералами, имеющими наименьшую твердость, в сравнении с вмещающими породами, то сульфиды будут подвержены наибольшему первичному разрушению, в результате, чего происходит рост содержания серы в тонкоизмельченных пылевых фракциях;

- размеров зерен и формы нахождения сульфидов в минерале, определяющие склонность к образованию мелких пылевых частиц с высоким содержанием серы.

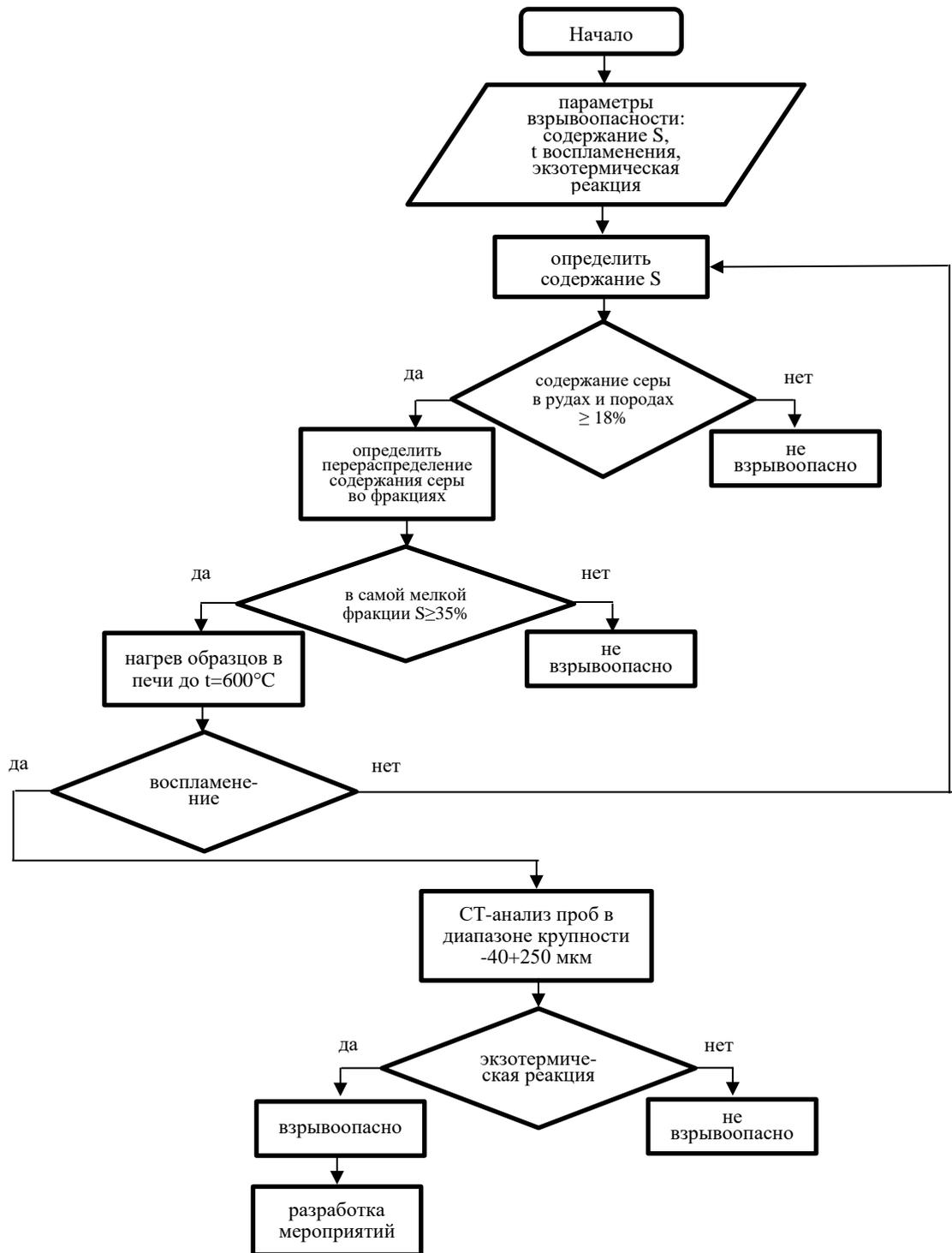


Рисунок 3.30 – Блок схема действий по оценке взрывоопасности сульфидной пыли

Поскольку в результате эксперимента выявлено, что наибольшее содержание серы соответствует меньшим фракциям (-40, -71+40, -100+71 мкм), то необходимо следить, чтобы значение содержания серы в них не достигло 35%. В случае, если содержание серы в различных фракциях ниже 35%, то пыль таких руд и пород относят к неопасным по фактору взрыва. Однако, при достижении значения 35% и более, пыль таких минералов относят к взрывоопасной, что определяет необходимость проведения следующих этапов исследования.

Далее определяют температуру самовоспламенения слоя сульфидной пыли, находящейся в осевшем состоянии, методом нагрева в печи. По результатам нагрева визуально определяют, подвержена ли пыль окислительным процессам при достижении высоких температур (600°C) - изменение цвета пыли до темно красных или бурых оттенков, наличие дымообразования, следов горения на стенках тиглей свидетельствует о протекании окислительных реакций с выделением тепла. В ходе проведения аналогичных исследований на породах и руда месторождений Сентачан и Шануч при отрицательных результатах не было обнаружено дымообразование, следов горения, спекания, а цвет пыли приобретал серо-желто-коричневые оттенки.

На заключительном этапе определения взрывоопасности пыли колчеданных месторождений проводят синхронный термический анализ, результаты которого позволяют определить термическую активность пыли, в том числе для различных классов крупности. Возникновение экзотермической реакции, зафиксированной термогравиметрической кривой и дифференциальной сканирующей калориметрия, свидетельствует о термической активности частиц пыли, причем, пыль одного типа руды теряет способность к взрывному горению с увеличением класса крупности частиц. Результаты СТ-анализа позволяют установить взрывоопасность пыли, а также размер частиц пыли, которые способствуют возникновению взрыва.

Заключение о возможности возникновения взрывоопасного сульфидного облака пыли в подземных горных выработках рудника приводится с учетом результатов выполненной оценки по каждому пункту исследований, согласно приведенной методике.

Выводы по главе 3

1. Разработана и апробирована методика изучения главных факторов пылевзрывобезопасности для сульфидных руд и пород, которая является составной частью системы промышленной безопасности. В рамках развития научно-методических и практических основ безопасного ведения подземных горных работ, методика обеспечивает возможность комплексно анализировать и оценивать состояние потенциальных источников опасности, оперативно выявлять результаты воздействия различных факторов, способствующих формированию взрывоопасной обстановки. Программа-исследований включает элементы авторских методов по оценке взрывоопасности сульфидной пыли в зависимости от содержания серы для различных классов крупности. В ходе ее реализации впервые установлено, что с уменьшением крупности частиц сульфидной пыли содержание серы в ней возрастает.

2. Определен комплекс факторов, оказывающих существенное влияние на взрывоопасность сульфидной пыли, формируемой в процессах первичной дезинтеграции колчеданных руд и пород. При анализе сульфидных руд и пород должны учитываться:

- минеральный состав колчеданных руд и пород, на основании которого возможно определить среднее содержание серы в различных классах крупности сульфидных пород, дать предварительную оценку взрывоопасности пыли по содержанию серы и, как следствие, определить потенциальную склонность сульфидной пыли к воспламенению;

- хрупкость минералов, слагающих породу, для выявления минерала, первоочередно склонного к разрушению;

- размер зерен и форма нахождения сульфида в минерале, определяющих их склонность к образованию мелких пылевых частиц.

3. Пылевые частицы сульфидов, размером более 100 мкм, не являются термически активными; при меньшем размере частиц склонность к взрывоопасности повышается с увеличением доли мелких фракций по экспоненциальной зависимости. Так, при нагреве образцов тонко измельченных сульфидов до температуры 600°C наблюдается характерная закономерность –

величина остаточной массы пробы пыли прямо пропорциональна величине ее крупности и снижается с 11,61% для пробы, крупностью -125+100 мкм, до 6,71% для пробы, крупностью менее 40 мкм. Это свидетельствует об увеличении интенсивности термического разложения пыли со снижением крупности частиц. Теплота взрыва обратно пропорциональна крупности пыли и увеличивается с 45,12 Дж/г для фракции -100+71 мкм до 58,4 Дж/г для фракции менее 40 мкм за счет увеличения площади удельной поверхности частиц, что является характерным признаком физико-химической реакции возгорания сульфидов.

4. При проведении СТ-анализа подобран корректный температурный режим нагрева и скорость образцов руд и пород. Рабочими параметрами явились – скорость нагрева 10°С/мин, минимальный максимум нагрева температур - 600°С. При возникновении экзотермических пиков, сопровождающихся резкой потерей массы и выделением значительного количества энергии, обязательным является исследование проб в более широком диапазоне температур до стабилизации процессов убыли массы.

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ ПО ФАКТОРУ ВЗРЫВЧАТОСТИ СУЛЬФИДНОЙ ПЫЛИ ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СИБАЙ, ШАНУЧ И СЕНТАЧАН

4.1. Технологические рекомендации для убогосульфидных руд

Технологические рекомендации при ведении горных работ по убогосульфидным рудам базируются на геолого-минералогическом исследовании вещественного состава образцов, которые включают изучение текстурно-структурных особенностей и определение перераспределения содержания серы в рудах и породах различных классов крупности, исследование процессов самовоспламенения сульфидной пыли, изучение термической активности пылей различных классов крупности, в том числе с определением совместимости применяемых видов ВВ. При оценке взрывоопасности сульфидной пыли в условиях разработки убогосульфидных руд необходимо обязательно учитывать специфику отработки рассматриваемого месторождения, а именно: горно-геологические особенности разработки месторождения, характеристику промышленных рудных тел, гидрогеологические условия, систему разработки, режим вентиляции рудника.

Комплекс вышеперечисленных мероприятий, а также алгоритм оценки склонности сульфидной пыли к взрывоопасности позволил сделать следующие выводы, относительно потенциальной взрывоопасности месторождений Сентачан и Шануч, характеризующихся относительно низким содержанием серы:

1. Результаты анализов свидетельствуют о том, что среднее содержание серы в рудах месторождения Сентачан составляет - 10,3% (проба кварц-антимонитовой руды Т-1) и не склонны к образованию взрывоопасной сульфидной пыли – то есть убогосульфидны и являются невзрывоопасными. Анализ проб руд месторождения Шануч (медно-никелевые руды ТП 40/3) свидетельствует, что среднее содержание серы в руде колеблется от 15 до 13,56 %, составляя в среднем - 13,56%. Это позволяет отнести, представленные образцы руды и рудной пыли Шанучского месторождения к невзрывоопасным пылям.

2. В ходе выполнения лабораторных исследований по изучению перераспределения серы в пробах руд месторождения Сентачан различных классов крупности установлено, что наибольшее содержание серы, обнаружено в классе крупности -40 мкм и составляет - 13,22%, в рудах месторождения Шануч – 16,67% (класс -40 мкм), что позволяет отнести пыль таких месторождений к не взрывоопасной.

3. При проведении испытаний по нагреву образцов пород и руд выявлено, что при нагреве образцов в печи до заданной температуры – 600 °С, руды месторождений Сентачан и Шануч не склонны к самовоспламенению при кратковременном воздействии на них высоких температур.

4. По результатам синхронного термического анализа установлено, что при нагреве образцов месторождений Сентачан (см. рис. 3.24) и Шануч (см. рис. 3.26), крупностью менее 40 мкм, происходит монотонная убыль массы, отображенная на ТГ-кривых, на ДСК-кривых не зафиксировано экзотермических пиков, что свидетельствует об отсутствии термической активности пыли, вероятность вспышки и взрыва ничтожно мала. В том числе установлена полная безопасность применения ВВ на основе аммиачной селитры в диапазоне температур воспламенения, исключено разложение ВВ в присутствии сульфидосодержащихся рудных шламов, буровой мелочи, вероятность испарения и фонтанирования, вспышки заряженных аммиачно-селитренными ВВ шпуров и скважин низка.

Таким образом, при ведении горных работ по убогосульфидным рудам месторождений Сентачан, Шануч, и идентичных им проведение противозрывных мероприятий, указанных в «Инструкции по предупреждению взрывов сульфидной пыли ...» [54], не требуется.

Комплекс проведенных мероприятий показал, что пыль, образующаяся на руднике Сентачан и Шануч, в пределах рудного тела, при различных технологических процессах – невзрывчатая. Следовательно, основные практические рекомендации сводятся к следующему: рекомендовано сохранить существующий порядок ведения горных работ с применением взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры на участках с убогосульфидными рудами и

вмещающими породами, применения специальных мероприятий, направленных на снижение риска взрывоопасности пыли, не требуется.

Однако стоит учитывать, что при изменении вещественного состава руд и пород и переходе на участки, характеризующиеся повышенным содержанием серы с рудами массивной текстуры и равномернозернистой структуры, следует уточнить возможность сохранения принятой технологии горных работ. При переходе на участки с повышенным содержанием сульфидов необходимо повторно провести оценку взрывоопасности пыли, формирующейся в ходе подземных горных работ, увеличить расстояние орошения призабойного пространства и оценить отсутствие условий, при которых пыли руд и вмещающих пород становятся взрывопожароопасным. Это - участки повышенного тепловыделения на расстоянии 100 м и ближе от места производства взрывных работ - горный массив, поверхность электрооборудования, шкафов управления, проводов и кабелей.

4.2. Технологические рекомендации для руд с высоким содержанием серы

Вопросы обеспечения безопасной подземной добычи сульфидных руд, сопряженных с отсутствием травматизма на горных предприятиях, всегда были частью комплекса задач по обеспечению безопасного освоения недр Земли. Объем извлекаемых горных пород и полезных ископаемых в связи с повышением интенсификации разработки месторождений постоянно увеличиваются, что в случае добычи сульфидных руд связано с увеличением рисков возникновения взрывов сульфидной пыли, и, в свою очередь, требует создания системы мер по предупреждению возникновения и в конечном итоге, исключению этого явления в процессе добычных работ.

Во избежание воспламенения сульфидной пыли под действием ударной воздушной волны, целесообразно воспользоваться её свойством терять способность к возгоранию пыли при увлажнении ее более чем на 9% масс. [54]. Поэтому, основным мероприятием, направленным на предотвращение взрывов сульфидной пыли, является увлажнение стенок и кровли выработки в зоне ведения взрывных работ. Для разработки мероприятий по снижению риска возникновения

взрывов сульфидной пыли была изучена зависимость расстояния орошения призабойной зоны при ведении взрывных.

Полученные данные о характере перераспределения содержания серы в сульфидных рудах и породах в зависимости от класса крупности влияют на пылевзрывобезопасность горных процессов, данный факт требует принятия технологических решений, учитывающих полученные знания. На основании данных о изменении содержания серы в зависимости от класса крупности (см. п. 3.2) в работе введен поправочный коэффициент k_S – коэффициент неоднородности содержания серы в руде, который учитывает класс крупности пылевых частиц.

Коллективом авторов в [30] предложено определять протяженность зоны орошения призабойной зоны при ведении взрывных работ - X . Предложенный метод расчета учитывает ряд физико-механических параметров, однако, представляется целесообразным ввести в него коэффициент k_S . Численно этот коэффициент выражается наибольшим относительным изменением содержания серы по результатам геолого-минералогической оценки.

Рассмотрим граничное условие возникновения взрыва в выработке, а именно достижение скачка давления на фронте ударновоздушной волны (ΔP) критической величины ($\Delta P_{\text{крит}}$) и θ – давление во фронте УВВ.

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{крит}}} = 1. \quad (4.1)$$

Известно, что величина критического скачка давления во фронте УВВ, при котором возможно возгорание колчеданной пыли под действием УВВ, $\Delta P_{\text{крит}}$ составляет 0,4 Мпа [30]. Таким образом, если при ведении взрывных работ произойдет взрыв сульфидной пыли, то произойдет возрастание давления во фронте УВВ, на величину Θ по сравнению со взрывом ВВ без взрыва сульфидной пыли:

$$\theta = \sqrt{1 + \frac{I_2}{I_1}}, \quad (4.2)$$

где: I_1, I_2 – удельные импульсы УВВ от взрыва заряда ВВ, от взрыва сульфидной пыли, выбрасываемой в выработку при взрыве, соответственно, кг/(м*с).

На основании (4.1), зависимости для определения ΔP величины критического скачка давления на фронте УВВ получено уравнение для определения расстояния от места взрывных работ до рассматриваемого места X:

$$\sqrt{1 + k_{\text{пыл.}}(k_{\text{гор}} + k_S) \left(\left(1 + \frac{2\delta_{\text{СКВ}}}{d_{\text{СКВ}}} \right)^2 - 1 \right) \frac{\rho_M q}{\rho_{\text{ВВ}} n Q_{\text{ВВ}}}} \cdot \zeta^{-1} \frac{Q_{\text{ВВ}}}{Q_{\text{АММ.}}} \left(7,25 \frac{n M_{\text{ВВ}}}{S X} 1,9 \sqrt{\frac{n M_{\text{ВВ}}}{S X}} \right) \exp \left(- \frac{\beta X}{d_{\text{ВЫР}}} \right) = 1 \quad (4.3)$$

где: $k_{\text{пыл.}}$ – коэффициент пыления, характеризующий долю пылевых частиц (до 300 мкм) в массе пород зоны измельчения; $k_{\text{гор.}}$ – коэффициент полноты сгорания пылевых частиц; k_S – коэффициент распределения содержания серы в руде в зависимости от класса крупности пылевых частиц; $\delta_{\text{СКВ}}$ – толщина слоя зоны измельчения вокруг скважины, м; $d_{\text{СКВ}}$ – диаметр взрывной скважины, м; ρ_M – плотность сульфидосодержащей породы, кг/м³; $\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность заряжения ВВ, кг/м³; q – удельная теплота горения сульфидной пыли, Дж/кг; n – массовая доля ВВ, идущая на образование УВВ; $Q_{\text{ВВ}}$ – удельная теплота взрыва ВВ, Дж/кг; ζ – общий коэффициент сопротивления движению УВВ на участке X; $Q_{\text{АММ.}}$ – удельная теплота взрыва аммонита бЖВ, Дж/кг; $M_{\text{ВВ}}$ – масса взрываемого ВВ, кг; S – площадь сечения выработки, м²; X – расстояние от места ведения взрывных работ до рассматриваемого места, м; β – коэффициент шероховатости стенок выработки; $d_{\text{ВЫР.}}$ – условный диаметр выработки ($d_{\text{ВЫР.}} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$), м.

Коэффициент шероховатости β определяется: 0,02 – для незакрепленных выработок, пройденных по простиранию и вкрест простирания по падению пород, и выработок, закрепленных торкрет-бетоном; 0,03 – выработок, закрепленных неполной крепежной рамой; 0,04 – незакрепленных выработок, пройденных вкрест простирания при обратном падении пород, и выработок, закрепленных арочной крепью [30].

Уравнение (4.3) подтверждает необходимость уточнения безопасного расстояния от забоя, на которое необходимо орошение водой поверхности выработки в призабойной зоне с учетом характера воздействия технологических процессов на массив сульфидных руд. Внесение поправочного коэффициента k_S

позволяет учесть новые знания о перераспределении серы в различных классах крупности пыли для предотвращения взрывов сульфидной пыли.

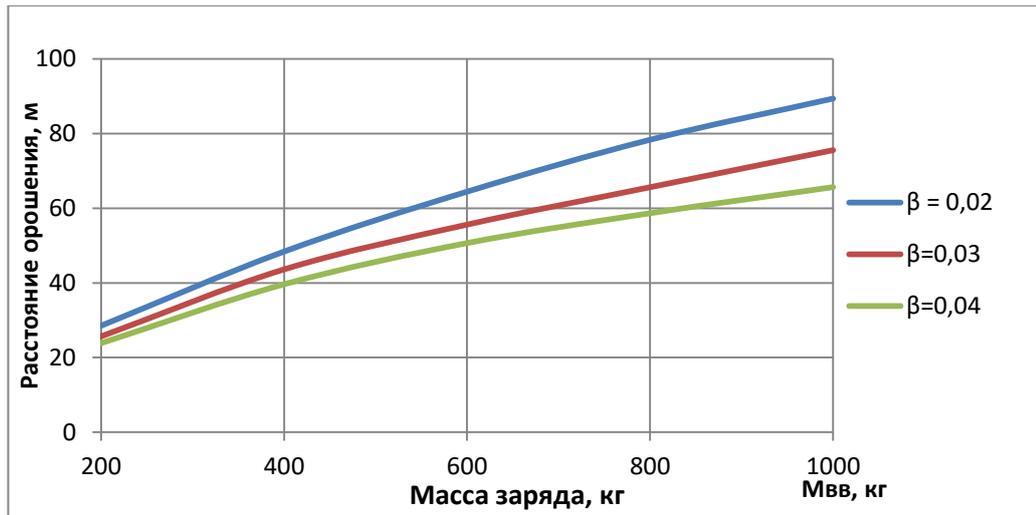
Поскольку не представляется возможным выразить X у уравнения (4.3) в явном виде, решим его методом последовательного приближения. Для решения рассматриваемого уравнения численным методом разработана программа для ЭВМ. При помощи разработанной программы, а также с учетом коэффициента k_S было установлено, что при ведении взрывных работ по серно-колчеданным породам месторождения Новый Сибай с учетом наибольшего относительного изменения содержания серы – 15,54% при заданных параметрах: $M_{ВВ} = 850$ кг; $d_{СКВ} = 0,89$ м; $\delta_{СКВ} = 0,04$ м; $\rho_{ВВ} = 900$ кг/м³; $\rho_M = 4000$ кг/м³; $S = 15,3$ м²; $n = 0,1$; $Q_{ВВ} = 4,4$ МДж/кг; $Q_{АММ} = 4,1$ МДж/кг; $q = 7$ МДж/кг; $k_{ПЫЛ.} = 0,1$; $k_{ГОР.} = 0,3$; $k_S = 0,1554$; $\beta = 0,04$; $\zeta = 1$ необходимо выполнять орошение призабойной зоны на расстояние не менее 52 м, что превышает нормативное значение «Инструкции...» [54] в 1,7 раза.

Для удобства практического использования представленных выше расчетных зависимостей в условиях разработки месторождения Новый Сибай при ведении горных работ по серно-колчеданным породам на рисунке 4.1 представлены графические зависимости для определения протяженности участков выработок, подлежащих орошению: для безопасного мгновенного взрывания скважинных зарядов массой - 200, 400, 600, 800 и 1000 кг, при площади сечения выработки – 10, 16, 20 м², с учетом коэффициента шероховатости стенок выработок.

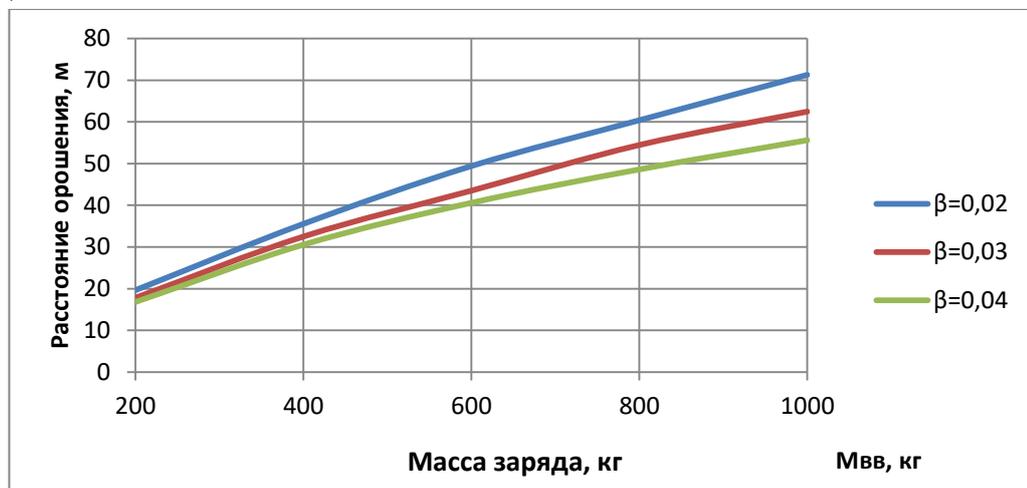
Анализ полученных данных, отраженных на графиках (рис. 4.1) показал, что при взрывании скважинных зарядов с массой до 200 кг дополнительной обработки стенок и кровли выработок не требуется. Достаточно стандартной обработки - орошение на расстояние 30 м от места взрыва.

При взрывании скважинных зарядов с массой 400 кг дополнительное орошение стен и кровли выработок требуется только для выработок с площадью сечения 10 и 16 м².

а)



б)



в)

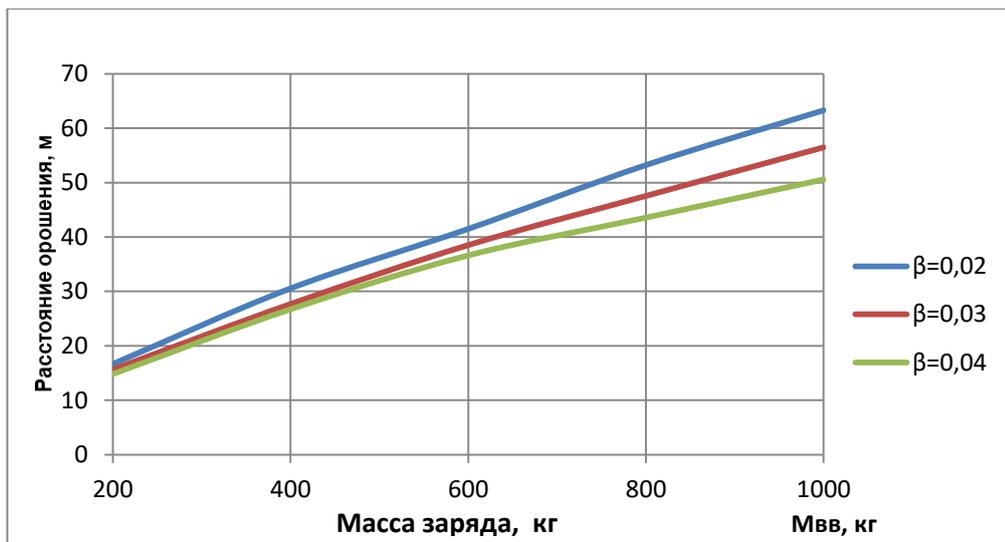


Рисунок 4.1 - Длина орошаемого участка выработки при взрывании скважинных зарядов при площади сечения выработок: 10 (а), 16 (б), 20 (в) м²

При ведении взрывных работ в выработке площадью сечения 20 м^2 , достаточно – орошение зоны на расстояние 30 м от места взрыва. При взрывании скважинных зарядов с массой $600\text{-}1000 \text{ кг}$ дополнительное орошение стен и кровли выработок требуется для всех рассмотренных сечений.

Величина дополнительной протяженности зоны орошения, при введении коэффициента k_S в формулу (4.1) составляет $4 - 11\%$ в зависимости от площади сечения выработки.

На основании формулы (4.3) и длины орошаемого участка выработки в зависимости от массы заряда ВВ $M_{ВВ}$, площади сечения выработки $S_{сеч}$ и коэффициента шероховатости стенок выработки β , приведенных на графиках 4.1 а-в, методом множественного нелинейного регрессионного анализа получена логарифмическая зависимость для определения зоны орошения выработки перед проведением взрывных работ:

$$l_{ор} = 28,95 \cdot \ln(M_{ВВ}) - 16,26 \cdot \ln(\beta) - 24,66 \cdot \ln(S_{сеч}) + 8,72 \cdot \ln(k_S) - 121,4, \quad (4.4)$$

где $M_{ВВ}$ – масса взрывающего ВВ, кг; β – коэффициент шероховатости стенок выработки; $S_{сеч}$ – площадь сечения выработки, м^2 ; k_S – коэффициент распределения содержания серы в руде в различных классах крупности пылевых частиц.

В формуле (4.4) отражены ключевые переменные параметры, определяющие расстояние орошения призабойной зоны. Логарифмическая зависимость (4.4) справедлива для условий, когда диаметр скважин ($d_{СКВ}$) не превышает $0,89 \text{ м}$, для прочих параметров рекомендуется применять усредненные и справочные значения: $\delta_{СКВ} = 0,04 \text{ м}$; $\rho_{ВВ} = 900 \text{ кг/м}^3$; $\rho_M = 4000 \text{ кг/м}^3$; $n = 0,1$; $Q_{ВВ} = 4,4 \text{ МДж/кг}$; $Q_{АММ.} = 4,1 \text{ МДж/кг}$; $q = 7 \text{ МДж/кг}$; $k_{ПЫЛ.} = 0,1$; $k_{ГОР.} = 0,3$; $\zeta = 1$.

Дополнительно для повышения надежности профилактических работ по орошению призабойного пространства, целесообразно предпринять меры, увеличивающие продолжительность нахождения (удержания) влаги в смоченном пылевом слое, покрывающем стенки и кровлю выработки. Например, для этого может быть использован водный раствор неорганических солей, способных к гидратации, либо известь. Также для повышения безопасности ведения подземных горных работ при разработке сульфидных месторождений целесообразно

отказаться от технологических решений, характеризующихся повышенным пылеобразованием.

Выбор технологических решений следует предварять оценкой текстурно-структурных особенностей строения колчеданных руд и пород и изучением термической активности пылевых частиц различных классов крупности, согласно разработанной программе-методике, приведенной в разделе 3.1. диссертации.

Кроме того, на основании обобщения и систематизации практических и экспериментальных данных в работе для предотвращения взрывов сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд разработаны технологические рекомендации:

- отказ от применения систем разработки с этажным принудительным обрушением и самообрушением в пользу систем разработки с подэтажным обрушением;
- отказ от проходки восстающих выработок методом секционного взрывания;
- сокращение массы единовременно взрываемых ВВ;
- отказ от бурения скважин увеличенного диаметра;
- расчет протяженности зоны орошения выработок с учетом предложенной расчетной формулы (4.4), а не по единому нормативному показателю.

4.3. Расчет вероятности возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывом сульфидной пыли

Неотъемлемой составляющей эффективного экономического развития горнодобывающего предприятия является оценка и предотвращение риска возникновения и развития аварийных ситуаций. В современных условиях система промышленной безопасности на предприятии базируется на статистических данных по количеству аварий, несчастных случаев, инцидентов и не предусматривает прогноз развития типовых и не типовых событий, следовательно, не позволяет эффективно управлять промышленной безопасностью труда. Для решения этой проблемы необходимо, не дожидаясь аварии, инцидента, несчастных случаев идентифицировать существующие опасности, оценивать и ранжировать

риски возникновения и развития типовых и нетиповых сценариев опасности, проводить мероприятия, направленные предотвращение возникновения развития нежелательных ситуации [23, 85].

В этой связи, применен рискориентированный подход к оценке вероятности возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывом сульфидной пыли. Это связано с тем, что заблаговременное выявление и предупреждение риска возникновения взрыва сульфидной пыли способствует снижению риска возникновения чрезвычайных ситуаций и является вопросом первостепенной важности.

В целях проведения анализа риска возникновения взрыва сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд применен обобщенный опыт оценки риска, включая международные принципы обеспечения безопасности.

Целью оценки риска взрыва сульфидной пыли является:

- выявление опасности воздействия поражающих факторов аварии на персонал, имущество, экологическую обстановку участка работ;
- обеспечение учета результатов оценки риска при выборе оптимальных технологических решений;
- минимизация риска аварии и связанных с ней угроз, вызванных формированием сульфидной пыли в ходе основных технологических процессов;
- обеспечение учета результатов оценки риска при разработке компенсирующих мероприятий по предотвращению взрывов сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд.

Идентификация опасности является качественным методом анализа опасностей технологических процессов, цель которой состоит в установлении основных опасностей, опасных факторов и событий, которые могут нарушить безопасную эксплуатацию объекта и нанести вред деятельности и всей технологической системе опасного производственного объекта в целом.

Риск рассчитывается по формуле:

$$P = B \times ТП, \quad (4.5)$$

где: Р – риск взрыва сульфидной пыли в условиях конкретного предприятия по добыче колчеданных руд; В – вероятность возникновения аварии; ТП – тяжесть последствия.

Оценка риска производится на основе качественного и количественного анализа риска аварии, определения уровня риска и сравнения с приемлемыми значениями, включая выбор мероприятий, направленных на достижение приемлемого уровня риска.

Критерии качественной оценки риска были разработаны с учетом положений ГОСТ Р ИСО 31000:2010 (ISO 31000:2009) «Менеджмент риска. Принципы и руководство» [40] и ГОСТ 27.310-95 «Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения» [38]. В качестве базового документа принято Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утв.пр. Ростехнадзора №144 от 11.04.2016 г [105].

На основе полученных расчетных данных присваиваются качественные оценки вероятности в соответствии с таблицей 4.1.

Таблица 4.1 – Качественная оценка вероятности событий [105]

Обозначение уровня	Наименование уровня	Описание	Численная оценка вероятности, д.е.
A	высокая вероятность, возможны повторные события	вероятно, произойдет на объекте	более 10^{-3}
B	возможный	события происходили на аналогичных объектах	от 10^{-4} до 10^{-3}
C	вероятный	может произойти	от 10^{-5} до 10^{-4}
D	маловероятный	может произойти, но не ожидается	от 10^{-6} до 10^{-5}
E	крайне маловероятный	произойдет при исключительных обстоятельствах	менее 10^{-6}

В соответствии с указанным Руководством [105] для проведения качественной оценки риска необходимо определить значения вероятностей исходных событий аварии и этапов реализации и вероятность развития аварии.

Блок-схема процесса оценки риска аварии на объекте и определения мер, направленных на снижение уровня риска аварии при эксплуатации объекта представлена на рисунке 4.2.

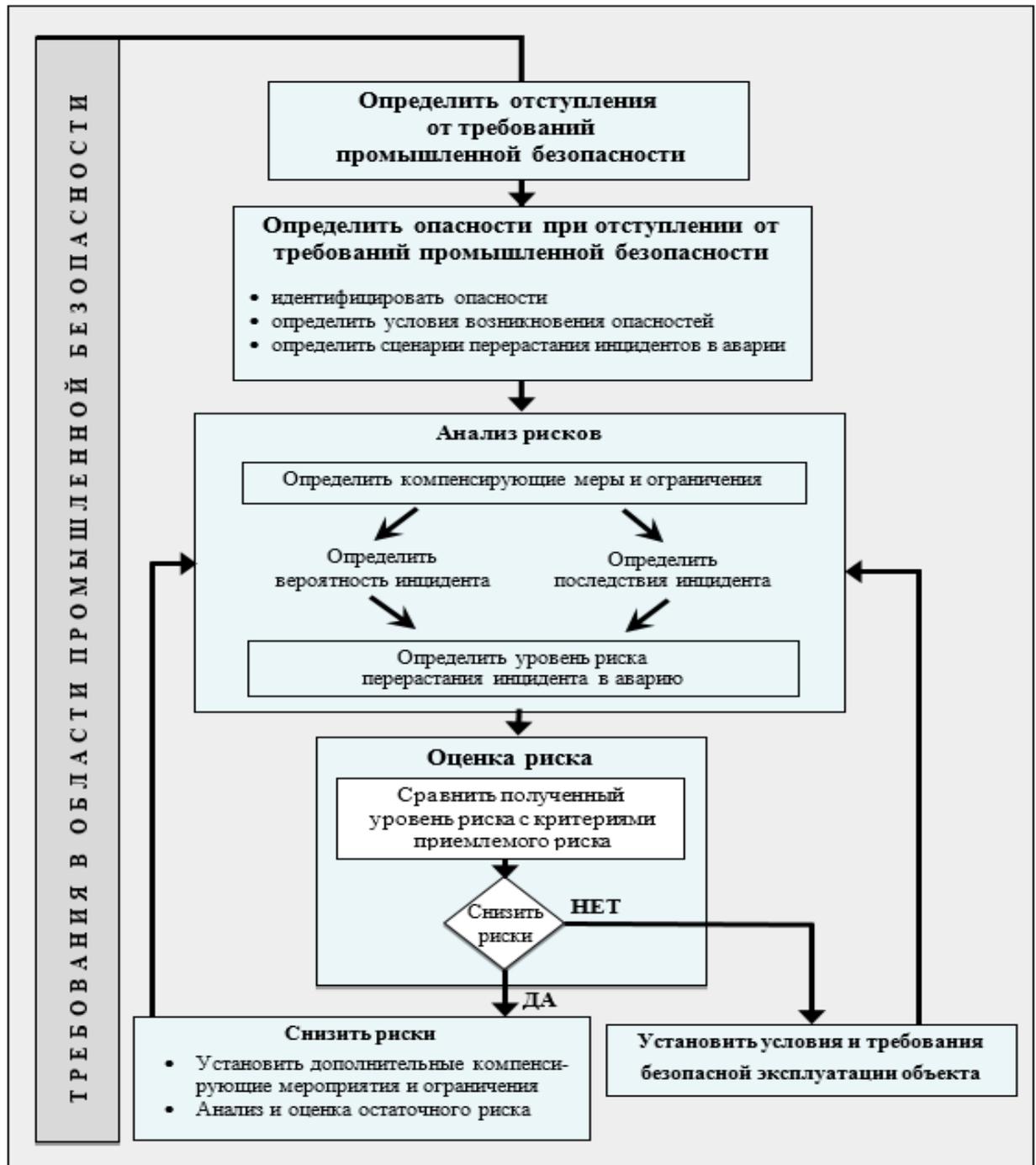


Рисунок 4.2 – Схема управления рисками [105]

Качественная оценка тяжести последствий определяется в соответствии с таблицей 4.2.

Таблица 4.2 – Качественная оценка последствий событий

Обозначение уровня	Наименование уровня (последствия)	Воздействие на людей	Воздействие на предприятие	Воздействие на окружающую среду	Экономический ущерб
5	катастрофические	многочисленные несчастные случаи	Нарушение технологического цикла. Требуется реконструкция	чрезвычайный экологический ущерб	более 150 млн. рублей
4	существенные	невосстанавливаемая полная нетрудоспособность, единичные несчастные случаи	Потеря подготовленных к выемке запасов. Повреждение или потеря запасов	существенный экологический ущерб	от 30 до 150 млн. рублей
3	умеренные	существенные травмы или ущерб здоровью, например, потеря рабочих дней	Повреждение оборудования и/или инфраструктуры, требующие ремонта	умеренный экологический ущерб	от 15 до 30 млн. рублей
2	малозначительные	небольшие травмы или ущерб здоровью	Аварии не влияют на технологический процесс	локальный экологический ущерб	от 1,5 до 15 млн. рублей
1	незначительные	незначительный ущерб для здоровья	Локальные ремонты	минимальный экологический ущерб	менее 1,5 млн. рублей

На этапе качественной оценки ключевым параметром оценки уровня последствий является воздействие на людей. Далее, согласно матрице оценки риска, с учетом таблицы 4.3 определяют уровень риска взрыва сульфидной пыли.

Таблица 4.3 – Матрица оценки рисков

Уровень вероятности событий	Оценка последствий событий				
	Незначительные	Малозначительные	Умеренные	Существенные	Катастрофические
	1	2	3	4	5
A (Высоко вероятный)	R _с	R _в	R _в	R _н	R _н
B (Возможный)	R _{пр}	R _с	R _в	R _в	R _н
C (Вероятный)	R _{пр}	R _{пр}	R _с	R _в	R _н
D (Маловероятный)	R _д	R _{пр}	R _с	R _в	R _н
E (Крайне маловероятный)	R _д	R _{пр}	R _с	R _с	R _в

Обозначения в таблице:

R_д – весьма низкий уровень (допустимый риск);
R_{пр} – низкий уровень (приемлемый риск);
R_с – средний уровень риска (практически возможный риск);
R_в – высокий уровень риска (возможный риск);
R_н – очень высокий уровень (требуется исследование и снижение уровня риска).

Управление рисками заключается в уменьшении вероятности возникновения аварий и снижении тяжести ее последствий путем разработки мер реагирования руководства, в соответствии с уровнем риска согласно таблице 4.4. с разработкой и реализацией при неудовлетворительном уровне риска аварии компенсирующих мероприятий.

Таблица 4.4 – Управление рисками

Уровень риска	Меры реагирования	Мероприятия	Примечание
Очень высокий (аварийное состояние) - R_H	Немедленная остановка работ на данном участке, вывод людей	Определение границ опасной зоны и запрет нахождения людей Проведение дополнительных исследований и разработка оперативных мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня	Возобновление работ по согласованию с территориальным органом Ростехнадзора
Высокий (предаварийное состояние) - R_B	Приостановка работ на данном участке, вывод людей и техники	Определение границ опасной зоны Проведение анализа ситуации и разработка оперативных мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня	Возобновление работ по решению технического руководителя эксплуатирующей организации на основании мониторинга ситуации
Средний (состояние ограниченной работоспособности) - R_C	Комиссионное решение о необходимости приостановки работ	Проведение анализа ситуации и разработка долгосрочных мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня	Контроль выполнения мероприятий
Низкий и весьма низкий (работоспособное состояние) - $R_D, R_{пр}$	Приемлемый риск, должен находиться под контролем, но не требует дополнительных мероприятий по его снижению	Мероприятий не требуется	-

В ходе оценки риска определен общий перечень опасностей, связанных с подземной разработкой месторождений колчеданных руд по фактору взрыва сульфидной пыли. На основе анализа условий разработки месторождений колчеданных руд, геологических и горнотехнических условий разработки, состава основных стадий технологического процесса, применяемого оборудования, средств

защиты и технических мер, направленных на обеспечение безопасности при ведении горных работ, были идентифицированы общие виды опасностей, которые представлены в таблице 4.5.

Для видов опасностей, связанных с образованием и распространением по выработкам сульфидной пыли, а также с проявлением её термической активности, определены сценарии развития аварии, включая исходные события, способные привести к возникновению взрыва сульфидной пыли.

Вероятность реализации аварии по сценарию определяется как совокупность вероятности исходного события и вероятностей этапов реализации, возникновение которых в определенном порядке и сочетании может привести к инциденту и развитию аварии.

Таблица 4.5 – Общие виды опасностей при разработке колчеданных месторождений по фактор взрыва сульфидной пыли

№ п/п	Наименование сценария	При каких условиях возможна авария	Возможное развитие аварии
C1	Взрыв сульфидной пыли, вследствие присутствия в зоне ведения буровзрывных работ неизолированных кабелей или проводов, служащих источником открытой электрической дуги	Естественный износ оболочки кабеля, его повреждение в ходе механического воздействия, некачественное покрытие изоляционной оболочки	Взрыв сульфидной пыли, оплавление вентиляционных рукавов, поступление горячего воздуха и продуктов горения в горные выработки, гибель и травмирование персонала, утрата оборудования, простой производства.
C2	Взрыв отложившейся сульфидной пыли в горной выработке	Повышенное пылевыведение при выполнении основных технологических процессов, ошибка проектирования некачественное проведение мероприятий по пылеподавлению	Скопление большого количества пыли, взрыв сульфидной пыли, оплавление вентиляционных рукавов, поступление горячего воздуха и продуктов горения в горные выработки, гибель и травмирование персонала, утрата оборудования, простой.
C3	Саморазогрев сульфидной пыли при зарядании ВВ в массиве горных пород	Ошибка проектирования, человеческий фактор, выход из строя оборудования	Взрыв сульфидной пыли, оплавление вентиляционных рукавов, поступление горячего воздуха и продуктов горения в горные выработки, гибель и травмирование персонала, утрата оборудования, простой.

Качественные оценки тяжести последствий аварии включают оценку вероятности причинения вреда персоналу, населению и причинению ущерба имуществу, а также окружающей среде.

Для сценариев развития аварии, связанных с образованием и взрывом сульфидной пыли, определены следующие уровни риска основных сценариев развития аварии:

Сценарий С.1 - взрыв сульфидной пыли вследствие присутствия в зоне ведения буровзрывных работ неизолированных кабелей или проводов, служащих источником открытой электрической дуги. Взрыв сульфидной пыли в горной выработке произойдет в случае наличия теплового источника и необходимой взрывоопасной концентрации сульфидной пыли (80 г/м^3), с размером ее частиц менее 100 мкм в рудах и породах с содержанием серы $\geq 18\%$. Принимая вероятность нахождения достаточного количества взрывоопасной сульфидной пыли в выработке, рассмотрим вероятность наличия нетипового теплового источника на примере аварии, произошедшей в 2017 г. на месторождении Сибайское.

Помимо разработки типовых сценариев аварий представляется целесообразным внутри таких сценариев при расчете вероятности взрыва сульфидной пыли рассмотреть нетиповые причины наличия неизолированных кабелей или проводов в горной выработке: прокладка кабеля с производственным браком, неосторожное обращение с кабелем, его естественный износ, несвоевременная замена кабеля, производственный брак, несоответствие электротехнических характеристик кабеля и применяемого оборудования.

Присутствие в зоне ведения буровзрывных работ неизолированных кабелей или проводов служит источником открытой электрической дуги. Кабель может быть поврежден в результате механического воздействия, носящего природный характер, например, возникновение горного удара или в результате повреждения его рабочим оборудованием, нарушением крепи, а также вследствие неудовлетворительного контроля за целостностью оболочки кабеля.

Вероятность возникновения взрыва сульфидной пыли в результате возникновения электрической дуги силового кабеля в горной выработке определяется, исходя из следующей совокупности вероятности:

$$P_{C.1} = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9) \times P_{10} \text{ (дол. ед.)}, \quad (4.6)$$

где P_1 – вероятность несвоевременной замены кабеля (дол. ед.); P_2 – вероятность повреждения кабеля в результате механического воздействия горного оборудования (дол. ед.); P_3 – вероятность некачественного соединения кабельных муфт (дол. ед.); P_4 – вероятность неверно подобранной защиты от КЗ (дол. ед.); P_5 – вероятность ошибки выбора кабеля по электротехническим характеристикам (дол. ед.); P_6 – вероятность естественного износа кабеля (дол. ед.); P_7 – вероятность прокладки кабеля с производственным браком (дол. ед.); P_8 – вероятность нарушения целостности оболочки кабеля под действием УВВ (дол. ед.); P_9 – вероятность повреждения кабеля в результате механического воздействия, вызванного природными силами (дол. ед.); P_{10} – вероятность скопления взрывоопасной концентрации сульфидной пыли в зоне возникновения электрической дуги (дол. ед.);

В ходе оценки риска определен перечень основных видов опасностей (P_1 - P_{10}), возникновение которых может привести к взрыву сульфидной пыли, при условии наличия достаточной взрывоопасной концентрации пыли (80 г/м^3), в случае возникновения электрической дуги в горной выработке при разработке месторождений колчеданных руд.

Качественная оценка вероятности возникновения и развития нежелательных событий проведена с учетом таблицы 4.1 и подразделяется на следующие категории:

- человеческий фактор ($1 - 1 \times 10^{-3}$);
- технологические, производственные факторы ($1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-5(-6)}$);
- природные факторы – природные явления, катаклизмы, катастрофы и т.д. ($1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-8(-9)}$).

Таким образом, вероятность возникновения взрыва сульфидной пыли, вследствие возникновения электрической дуги в кабеле по причине человеческого фактора, определена совокупностью вероятностей P_1 - P_5 ; совокупность

вероятностей технологических факторов отражена в P_6-P_8, P_{10} ; к природным факторам отнесена вероятность - P_9 .

Сценарий С.2 - взрыв отложившейся в горной выработке сульфидной пыли. Для возникновения взрыва сульфидной пыли в горной выработке необходимо скопление взрывоопасной концентрации сульфидной пыли (от 80 г/м³) при содержании серы в рудах и/или породах $\geq 18\%$, а также источника воспламенения. На базе закономерностей, установленных в 3.2 о перераспределении содержания серы в зависимости от класса крупности, необходимо принять данный факт опасности за вероятностный. Как было отмечено в 4.2, существует ряд технологических решений, характеризующихся повышенным пылеобразованием, которые связаны с произошедшим техническим перевооружением подземных рудников и необходимостью наращивания производственных мощностей, а именно:

- увеличение количества бурения шпуров и скважин, в том числе увеличенного диаметра;
- увеличение объемов взрывааемых руд и пород с повышенным расходом ВВ;
- применение систем разработки с этажным принудительным обрушением и самообрушением;
- повсеместное внедрение мобильного транспорта, ставшего новым источником пыления в подземных условиях.

Источником возникновения открытого пламени в горной выработке может послужить несоблюдение правил эксплуатации производственного оборудования и электротехнических устройств, проведение взрывных работ в горной выработке, неосторожное обращение с пожаро- и взрывоопасными материалами.

Взрыв произойдет в случае наличия достаточной взрывоопасной концентрации сульфидной пыли, что в свою очередь является следствием недостаточного объема противопылевых мероприятий. Таким образом, вероятность гипотетически возможной аварии определяется, исходя из совокупности вероятностей возникновения событий:

$$P_{C.2} = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \times P_5 \times (P_6 + P_7 + P_8) \text{ (дол. ед.)}, \quad (4.7)$$

где P_1 – вероятность образования большого количества взрывоопасной сульфидной пыли при бурении скважин увеличенного диаметра (дол. ед.); P_2 – вероятность образования большого количества взрывоопасной сульфидной пыли при большой массе единовременной взрываеваемой массы ВВ (дол. ед.); P_3 – вероятность образования большого количества взрывоопасной сульфидной пыли из-за нарушения технологических решений в части применяемой системы разработки (дол. ед.); P_4 – вероятность возникновения взрывоопасного содержания серы ($\geq 18\%$) в пыли руд и пород, вследствие неучтенного перераспределения содержания серы в зависимости от класса крупности пылевых частиц (дол. ед.); P_5 – вероятность недостаточной длины орошения призабойной зоны перед проведением взрывных работ (дол. ед.); P_6 – вероятность неосторожного обращения с огнём (дол. ед.); P_7 – вероятность несоблюдения правил эксплуатации производственного оборудования и электротехнических устройств (дол. ед.); P_8 – вероятность возникновения открытого огня при проведении взрывных работ (дол. ед.).

Сценарий С.3 - саморазогрев сульфидной пыли при зарядании ВВ в массиве горных пород. Известны случаи [100] проявления активного разложения аммиачной селитры в присутствии сульфидосодержащих шламов в промышленных условиях (испарения и фонтанирования, вспышки заряженных аммиачно-селитренных ВВ шпуров и скважин). Природа этого явления – каталитическое действие содержащихся в горных породах сульфидов на реакции разложения аммиачной селитры. При зарядании скважин и шпуров промышленными гранулированными ВВ, очевидно, что, чем мельче включения сульфидной пыли и чем их больше, тем выше вероятность разогрева ВВ до критических значений. Факторами, способствующими развитию окислительных реакций, являются: температура горного массива, наличие и кислотность шахтных вод в заряжаемых скважинах, содержание пирита. Для предотвращения подобных явлений проводят лабораторные исследования по изучению совместимости промышленных ВВ с рудами и породами, в том числе методом ТГ-анализа.

Подобный сценарий аварии может быть реализован при зарядании скважины или шпура гранулированными ВВ при наличии в них высокосульфидной

буровой мелочи, пренебрежения требованиями безопасности на этапе проектирования, халатного отношения, нарушений правил ведения БВР.

В ходе оценки риска определен перечень основных видов опасностей, возникновение которых может привести к возникновению взрыва сульфидной пыли по сценарию С.3, исходя из совокупности вероятностей возникновения событий:

$$P_{С.3} = P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \times P_5 \times P_6 \text{ (дол.ед.)}, \quad (4.8)$$

где P_1 – вероятность полного или частичного невыполнения мероприятий по промывке шпуров и скважин от сульфидосодержащих шламов (дол.ед.); P_2 – вероятность отсутствия проведения работ по совместимости промышленных ВВ в условиях разработки колчеданных руд и пород (дол.ед.); P_3 – вероятность неудовлетворительного контроля за температурой взрываемого массива (дол.ед.); P_4 – вероятность притока шахтных вод, в том числе с повышенной кислотностью (дол.ед.); P_5 – вероятность неучтенного содержания сульфидов во взрываемых рудах и породах (дол.ед.).

Для основных видов опасностей были определены сценарии развития аварии, включая исходные события, возникновение инцидентов и их вероятности. На основе полученных значений вероятностей были определены вероятности развития инцидентов в аварию (табл. 4.6): при возникновении электрической дуги в горной выработке, а также с учетом технологических процессов, характеризующихся повышенным пылеобразованием и при саморазогреве сульфидной пыли при зарядании ВВ в скважине.

Анализ данных таблицы 4.6 свидетельствует, что для возможных сценариев развития аварии, в соответствии с таблицей 4.1, были присвоены численные оценки вероятности, а в соответствии с таблицей 4.2, были определены количественные оценки тяжести последствий аварии.

Качественные оценки тяжести последствий аварии включают оценку причинения вреда персоналу, населению и причинению ущерба имуществу, а также окружающей среде.

Таблица 4.6 – Возможные причины инцидентов и аварий и оценка вероятности их возникновения

№	Инцидент	Исходные события, этапы реализации аварии	Вероятности реализации исходных событий, год ⁻¹	Вероятность инцидента, год ⁻¹	Качественный показатель уровня вероятности	Качественный показатель тяжести последствий	Уровень риска
1	2	3	4	5	6	7	8
С.1	Взрыв сульфидной пыли вследствие присутствия в зоне ведения буровзрывных работ неизолированных кабелей или проводов, служащих источником открытой электрической дуги.	Несвоевременная замена кабеля (P_1)	10^{-3}	$2,3121 \times 10^{-5}$	С (Вероятный)	4 (Существенные)	R_в – высокий уровень риска (возможны й риск)
		Повреждение кабеля в результате механического воздействия горного оборудования (P_2)	10^{-2}				
		Некачественное соединения кабельных муфт (P_3)	10^{-2}				
		Неверно подобранная защита от короткого замыкания (P_4)	10^{-3}				
		Ошибка выбора кабеля по электротехническим характеристикам (P_5)	10^{-3}				
		Естественный износ кабеля (P_6)	10^{-5}				
		Прокладки кабеля с производственным браком (P_7)	10^{-5}				
		Нарушение целостности оболочки кабеля под действием УВВ (P_8)	10^{-4}				

Продолжение таблицы 4.6

1	2	3	4	5	6	7	8
		Повреждение кабеля в результате механического воздействия, вызванного природными силами (P_9)	10^{-6}				
		Скопление взрывоопасной концентрации сульфидной пыли в зоне возникновения электрической дуги (P_{10})	10^{-3}				
C.2	Взрыв отложившейся сульфидной пыли в горной выработке	Образование большого количества взрывоопасной сульфидной пыли при бурении скважин увеличенного диаметра (P_1)	10^{-3}	$4,03 \times 10^{-3}$	А (высокая вероятность, возможны повторные события)	5 (катастрофические)	R_n – очень высокий уровень риска (требуется исследование и снижение уровня риска)
		Образование большого количества взрывоопасной сульфидной пыли при большой массе единовременной взрываеваемой массы ВВ (P_2)	10^{-3}				
		Образование большого количества взрывоопасной сульфидной пыли из-за нарушения технологических решений в части применяемой системы разработки (P_3)	10^{-3}				

Продолжение таблицы 4.6

1	2	3	4	5	6	7	8
		Возникновение взрывоопасного содержания серы ($\geq 18\%$) в пыли руд и пород, вследствие неучтенного перераспределения содержания серы в зависимости от класса крупности пылевых частиц (P_4)	10^{-3}				
		Недостаточная длина орошения призабойной зоны перед проведением взрывных работ (P_5)	1				
		Неосторожное обращения с огнём (P_6)	10^{-3}				
		Несоблюдение правил эксплуатации производственного оборудования и электротехнических устройств (P_7)	10^{-2}				
		Возникновение открытого огня при проведении взрывных работ (P_8)	1				

Продолжение таблицы 4.6

1	2	3	4	5	6	7	8
С.3	Саморазогрев сульфидной пыли при зарядании ВВ в массиве горных пород.	Полное и частичное невыполнение мероприятий по промывке шпуров и скважин от сульфидосодержащих шламов (P_1)	10^{-3}	10^{-16}	Е (крайне маловероятно)	4	R_c - средний уровень риска (практиче- ски возможный риск)
		Отсутствия проведения работ по совместимости промышленных ВВ в условиях разработки колчеданных руд и пород (P_2)	10^{-3}				
		Неудовлетворительный контроль за температурой взрываемого массива (P_3)	10^{-2}				
		Приток шахтных вод, в том числе с повышенной кислотностью (P_4)	10^{-6}				
		Неучтенное содержание сульфидов во взрываемых рудах и породах (P_5)	10^{-3}				

На основе полученных оценок вероятности и тяжести последствий, согласно матрице оценки риска (таблица 4.3) для каждого сценария развития аварии дана количественная оценка уровня риска.

Сценарии развития аварии, реализация которых возможна при разработке месторождений колчеданных руд, количественные оценки вероятности, тяжести последствий и уровни риска аварии сведены в таблице 4.6.

Для сценариев развития аварии, связанных с ведением горных работ на колчеданных месторождениях при оценке опасностей по фактору взрыва сульфидной пыли были определены следующие уровни риска основных сценариев развития аварии:

- С.1. Взрыв сульфидной пыли вследствие присутствия в зоне ведения буровзрывных работ неизолированных кабелей или проводов, служащих источником открытой электрической дуги – С4 (возможный риск). Согласно таблице 4.4 по управлению рисками необходимо выполнить определение границ опасной зоны, провести анализа ситуации и разработать оперативные мероприятия по снижению риска до приемлемого уровня. В данном случае для снижения уровня риска до приемлемого достаточно проведение системных мероприятий по проверке изолированности кабелей и проводов в горных выработках. Решение о возобновлении работ принимает технический руководитель эксплуатирующей организации на основании выполненного мониторинга.

- С.2. Взрыв отложившейся сульфидной пыли в горной выработке – А5 (очень высокий уровень риска). Сценарий аварии, связанный с образованием, накоплением и возникновением взрыва сульфидной пыли, получил самый высокий уровень вероятности возникновения аварии. Такая критическая оценка опасности характеризует процессы, произошедшие в изменении технологии ведения подземных горных работ, на фоне истощения минерально-сырьевой базы страны и процессов интенсификации горных работ, влияющих на образование пыли взрывоопасной сульфидной пыли. В том числе основополагающим фактором возникновения взрыва сульфидной пыли является отсутствие эффективных мер пылеподавления.

Управление риском, согласно таблице 4.4, заключается в определении границ опасной зоны и запрете нахождения в ней людей, также требуется

разработка и реализация компенсирующих мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня, включающих: отказ от применения систем разработки с этажным принудительным обрушением и самообрушением в пользу систем разработки с подэтажным обрушением; отказ от проходки восстающих выработок методом секционного взрывания; сокращение массы одновременно взрываемых ВВ; отказ от бурения скважин увеличенного диаметра; орошения выработок с учетом предложенной расчетной формулы (4.4), а не по единому нормативному показателю. Возобновление работ будет произведено по согласованию с территориальным органом Ростехнадзора.

- С.3. Саморазогрев сульфидной пыли при зарядании ВВ в массиве горных пород. – Е4 (крайне маловероятно, средний уровень риска). Полагаясь на опыт ведения горных работ, действительно, подобных сценариев развития аварий известны единичные случаи. Для сценария развития аварии, связанной с саморазогревом сульфидных шламов в присутствии ВВ достаточно решения комиссии о необходимости приостановки работ и проведение анализа ситуации с разработка долгосрочных мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня. Практические мероприятия сводятся к лабораторному определению совмести промышленных ВВ с колчеданными рудами, контролю за температурой рудного массива и наличием шахтных вод и их кислотностью, содержанием сульфидов в рудном массиве, соблюдением правил техники безопасности при ведении БВР, подбором типа ВВ, обеспечивающего отсутствие разогрева при контакте с колчеданными рудами.

Выполненный расчет вероятностей возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных формированием и последующим возникновением взрыва сульфидной пыли показал, что в результате реализации разработанных компенсирующих мероприятий риски развития аварии принимают приемлемый уровень.

Выполненная оценка рисков подтверждает, что для исключения эмпирически возможных аварий необходимо совершенствование требований промышленной безопасности, установленных в нормативно-правовой документации, действующей на территории Российской Федерации при ведении

подземных горных работ на колчеданных месторождениях по фактору взрыва сульфидной пыли.

Выводы по 4 главе

1. На основании выполненных исследований разработаны технологические рекомендации для обеспечения безопасности по фактору взрывчатости сульфидной пыли при ведении горных работ при разработке убогосульфидных руд на примере месторождений Шануч и Сентачан, а также месторождений с высоким содержанием серы на примере месторождения Сибайское.

2. Определены основные параметры, влияющие на длину орошения выработки перед проведением взрывных работ. Доказано, что для предотвращения взрыва сульфидной пыли длина орошения водой выработки, прилегающей к месту взрыва, не является величиной постоянной и зависит от массы взрываемого ВВ ($M_{ВВ}$), коэффициента шероховатости стенок выработки (β), площади сечения выработки ($S_{сеч}$), коэффициента неоднородности минерального состава сульфидной пыли различного класса крупности (k_s):

$$l_{ор} = 28,95 \cdot \ln(M_{ВВ}) - 16,26 \cdot \ln(\beta) - 24,66 \cdot \ln(S_{сеч}) + 8,72 \cdot \ln(k_s) - 121,4.$$

3. Обоснована необходимость применения рискоринтированного подхода для расчета вероятности возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывом сульфидной пыли.

4. Определен уровень риска возникновения взрывоопасной ситуации в присутствии горючей сульфидной пыли, исходя из совокупности вероятностей возникновения типовых и нетиповых событий для обеспечения эффективного и безопасного освоения месторождений колчеданных руд.

5. Определено, что рассматриваемые сценарии возникновения и развития рисков находятся на приемлемом уровне после реализации разработанных компенсирующих мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основании выполненных автором экспериментальных и теоретических исследований решена актуальная научно-практическая задача обоснования технологических решений по предотвращению взрывов сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд. Определены основные факторы, влияющие на взрыв сульфидной пыли, оценена вероятность возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывами сульфидной пыли, разработаны технологические рекомендации по снижению риска их возникновения.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что в связи с истощением минерально-сырьевой базы России произошли существенные изменения условий техногенного преобразования недр при подземной разработке месторождений колчеданных руд. Это связано с увеличением объемов извлечения бедных руд из недр, повсеместным внедрением мобильного транспорта, ставшего новым источником пыления в подземных условиях, повышением интенсивности ведения буровых и взрывных работ. Произошедшие изменения предопределили необходимость проведения исследований в соответствии с поставленными в диссертации целью и задачами.

2. Для проведения исследований разработана и апробирована методика изучения основных факторов пылевзрывобезопасности при разработке сульфидных руд и пород. В рамках развития научно-методических и практических основ безопасного ведения подземных горных работ применение данной методики обеспечивает возможность комплексно анализировать и оценивать состояние потенциальных источников взрывоопасности, выявлять результаты воздействия различных факторов, способствующих формированию взрывоопасной обстановки. Программа-исследований включает элементы авторских методов по оценке взрывоопасности сульфидной пыли в зависимости от содержания серы для различных классов крупности пылевых частиц. В ходе реализации методики впервые установлено, что с уменьшением крупности частиц сульфидной пыли содержание серы в ней возрастает. Так, с уменьшением крупности частиц

сульфидной пыли до -40 мкм абсолютное отклонение по содержанию серы составило 2,27-6,53%.

3. Пылевые частицы сульфидов, размером более 100 мкм, не являются термически активными; при меньшем размере частиц склонность к взрывоопасности повышается с увеличением доли мелких фракций по экспоненциальной зависимости. Так, при нагреве образцов тонко измельченных сульфидов до температуры 600°C наблюдается характерная закономерность – величина остаточной массы пробы пыли прямо пропорциональна величине ее крупности и снижается с 11,61% для пробы, крупностью -125+100 мкм, до 6,71% для пробы, крупностью менее 40 мкм. Это свидетельствует об увеличении интенсивности термического разложения пыли со снижением крупности частиц. Теплота взрыва обратно пропорциональна крупности пыли и увеличивается с 45,12 Дж/г для фракции -100+71 мкм до 58,4 Дж/г для фракции менее 40 мкм за счет увеличения площади удельной поверхности частиц, что является характерным признаком физико-химической реакции возгорания сульфидов.

4. Установлено, что пыль крупностью более 100 мкм не является термически активной, то есть в условиях возникновения взрыва, такая пыль будет лишь поддерживать процессы взрывного горения, но не будет являться первоисточником возникновения взрыва. По данным синхронного термического анализа проба серно-колчеданной породы месторождения Сибайское с содержанием серы 42% проявила термическую активность в диапазоне температур 183-197,9°C для классов крупности - -40, -71+40, -100+71 мкм. При изучении медно-цинковой руды со средним содержанием серы 37,2%, термическая активность зафиксирована в диапазоне температур 189,9-217,5°C в идентичном диапазоне класса крупности частиц от -40 до 100 мкм. При нагреве частиц сульфидной пыли крупностью свыше 100 мкм на ДСК и ТГ-кривых отсутствует быстропотекающая реакция с выделением тепла, сопровождаемая резкой потерей массы.

5. Определен комплекс факторов, оказывающих влияние на взрывоопасность сульфидной пыли, формируемой в процессах первичной дезинтеграции колчеданных руд и пород. Установлена необходимость при анализе

сульфидных руд и пород учета их: минерального состава с оценкой среднего содержания серы в различных классах крупности и учета хрупкости минералов, слагающих сульфиды и вмещающих породы для выявления минерала, наиболее склонного к разрушению, определения, размера зерен и формы нахождения сульфидов в минерале, определяющих их склонность к образованию мелких пылевых частиц. Содержание серы во фракции -125+100 мкм составляет 8,73%, во фракции -40 мкм – 13,22%, что указывает на более высокую концентрацию серы в мелкой фракции и предопределяет необходимость дифференцированной оценки содержания серы по фракциям. Минеральный состав руды представлен кварцем с коэффициентом твердости 7, антимонитом – коэффициент крепости 2-2,5 и арсенопиритом – коэффициент крепости 5,5. Доказано, что в процессе дезинтеграции первоначально разрушающему импульсу подвержены более хрупкие серосодержащие минералы.

6. Установлено, что строение минерала, содержащего серу, а именно величина его зерен, определяет вероятность риска более высокого содержания серы в мелких фракциях (-40, -71+40, -100+71 мкм), образованных в результате первичного измельчения руды при техногенном воздействии на массив, и, следовательно, являются фактором, представляющим опасность взрыва сульфидной пыли. С учетом перераспределения содержания серы при первичной дезинтеграции в мелких фракциях оценен риск взрывоопасности при разработке месторождений колчеданных руд с содержанием серы свыше 18%.

7. Обосновано, что протяженность зоны орошения выработок перед взрывом для смыва пыли с их стенок и кровли не является величиной постоянной, а зависит от массы взрываемого ВВ ($M_{ВВ}$, кг), коэффициента шероховатости стенок выработки (β), площади сечения выработки ($S_{сеч}$, м²), коэффициента неоднородности минерального состава сульфидной пыли (k_s) с учетом класса крупности пылевых частиц и определяется по формуле: $l_{ор} = 28,95 \cdot \ln(M_{ВВ}) - 16,26 \cdot \ln(\beta) - 24,66 \cdot \ln(S_{сеч}) + 8,72 \cdot \ln(k_s) - 121,4$. На основании расчетов при взрывании скважинных зарядов с массой до 200 кг обработки стенок и кровли выработок на расстояние свыше 30 м не требуется. При взрывании скважинных зарядов с массой 400 кг орошение стенок и кровли выработок за

пределами 30 м требуется только для выработок с площадью сечения 10 и 16 м², при площади сечения свыше 20 м², достаточно орошение зоны на расстояние 30 м от места взрыва. При взрывании скважинных зарядов с массой 600-1000 кг орошение стен и кровли выработок требуется для всех рассмотренных сечений на расстояние от 37 до 80 м в зависимости от изменения вышеперечисленных параметров. Разработанные рекомендации применимы к месторождениям колчеданных руд с содержанием серы более 18%.

8. Разработаны практические рекомендации, снижающие вероятность взрыва сульфидной пыли при разработке месторождений колчеданных руд, включающие: отказ от применения систем разработки с этажным принудительным обрушением и самообрушением в пользу систем разработки с твердеющей закладкой; отказ от проходки восстающих выработок методом VCR; сокращение массы единовременно взрывааемых ВВ; отказ от бурения скважин увеличенного диаметра.

9. Выполненная оценка вероятностей возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывом сульфидной пыли для условий комбинированной отработки Сибайского месторождения, показала, что риски превышают допустимый уровень. На основе анализа наиболее распространенных сценариев возникновения и развития аварий по фактору взрыва сульфидной пыли проведена идентификация опасностей. Установлено, что вероятность взрыва сульфидной пыли при наличии незаизолированных проводников составляет $2,31 \times 10^{-5}$, в результате накопления отложений сульфидной пыли на контуре горных выработок и поверхности размещенного в них оборудования - $4,03 \times 10^{-3}$, по фактору взрыва в результате разогрева сульфидной пыли при взаимодействии с ВВ на основе аммиачной селитры 10^{-16} . Внедрение разработанных компенсирующих мероприятий снижает риск аварии до «приемлемого уровня».

Список литературы

1. Bent H.C. Fire prevention at Noranda // Mines Canading Mining Journal. 1957. - №9.
2. Brzustowski T.A., Glassman I.K. Heterogeneous combustion. Academic Press: N-York, 1974.
3. Chernobai, V. I., Moldovan, D. V. Model of formation of dust and gases in the explosion chamber of the blasthole charge in sulphur-containing ore // Journal of Industrial Pollution Control. - 2017. - Vol. 33(1). - P. 804-808.
4. Introduction to Thermal Analysis. Techniques and Applications / Michael E. Brown. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. – 266 p.
5. Kalkert N., Schecker H. Einfluss der konverteilung auf die Mindestzundenergie von explosiblen Stauben.-Chem-Ing.-Tecn., 1980, Bd.52, N6, p. 515-517.
6. Principles of Thermal Analysis and Calorimetry / P.J. Haines. –Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2002. – 222 p.
7. Prodan M., Lupu L-A., Ghicioi E., Nalboc I., Szollosi-Mota A. Pyrophoric sulfides influence over the minimum ignition temperature of dust cloud // Citation: AIP Conference Proceedings 1918, №020001 - 2017.
8. Safety management of underground combustible sulphide dust // Guideline. Department of Industry and Resources / MOSHAV Approved. - December 1997. - Document №: ZMI578XC.
9. Айнбиндер Г.И., Демчишин М.Д., Губина Е.А., Вдовина В.В., Зуев С.А., Девликанов М.О. Исследование пожаровзрывоопасности образцов горных пород Кызыл-Таштыгского полиметаллического месторождения // Пожарная безопасность. – 2017. – № 4. - С. 70–73.
10. Айнбиндер И.И., Митишова Н.А., Гавриленко В.В. Обоснование условий и механизма взрывания сульфидной пыли // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. – М.: ИПКОН РАН, 2018. – С. 45-48.
11. Алешин А.С. Исследование взрывов колчеданной пыли и способов борьбы с ними на горизонтах выпуска и вторичного дробления руды: дис. ... канд. техн. наук. - Свердловск, 1969. - 179 с.
12. Алешин А.С., Чернявский Э.И., Куликов В.М., Копнов А.Т. Предохранительный заряд ВВ для дробления взрывоопасных колчеданных руд // Цветная металлургия. – 1970. - №20. – С. 15-16.
13. Алешин А.С., Ярцев В.А. Исследование пылеобразования при дроблении взрывоопасных колчеданных руд накладными зарядами ВВ // Известия высших учебных заведений. – 1969. - №3. – С.56-59.
14. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1970. 596 с.

15. Барон Л.И. Оценка пылевой опасности и противопылевых мероприятий на металлическом руднике / Л.И. Барон, Ф.К. Бегларян.-Ереван: Айастан, 1977. – 222 с.
16. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шектер Б.И. Физика взрыва // Физматиздат. – 1975. – 704 с.
17. Бахаревич Н.С., Романов А.И. Чувствительность сульфидных пылей к термическому и взрывному импульсу // Сб. Взрывное дело. – 1962. - №49/6. – С. 181-189.
18. Бахаревич Н.С., Романов А.И., Павловский Л.Г., Хорев В.А. Предохранительные взрывчатые вещества для рудников, опасных по взрывам сульфидной пыли // Сб. Взрывное дело. – 1962. - №49/6. – С. 190-201.
19. Бекчиу В.Н., Захаров В.А., Чернявский Э.И., Манаков В.Я. Влияние некоторых горнотехнических факторов на взрывы сульфидной пыли при скважинном взрывании // Труды ин-та Унипромедь. – 1970. – Вып.ХІІІ. – С. 101-104.
20. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением /Госэнергоиздат, 1962. – 331 с.
21. Взрывные явления. Оценка и последствия: Кн.1. / Бейкер У., Кокс П., Уэйстайн П. и др.- М.: Мир, 1986. – 396 с.
22. Волянски П. Воспламенение и горение органических пылей в ударных волнах // Физика горения и взрыва. – 1984. – Т.20. - №5. – С. 29-35.
23. Воробьева О.В. Модель оценки риска травм и аварий с учетом влияния человеческого фактора // ГИАБ. – 2009. - №12. – с. 61-72.
24. Воронин В.Н., Воронина Л.Д., Багриновский А.Д. Руководство по проектированию и практическому осуществлению противопылевых вентиляционных режимов в металлических рудниках. М.: Государственно научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1960. – 204 с.
25. Воронин В.Н. Основы рудничной аэрогазодинамики. М.: Углетехиздат, 1951. – 492 с.
26. Воронин В.Н. Параметры вентиляционной струи, характеризующей эффективность выноса пыли из горных выработок. Т. I. М.: Изд-во АН СССР, 1953. – С. 97-114.
27. Воронюк А.С., Матвиенко Н.Г. Особенности способов и схем вскрытия, подготовки запасов и проветривания газо- и пожароопасных рудников // ГИАБ. – 2008. – Отдельный выпуск №5 «Аэрология». С. 233–242.
28. Временная инструкция по борьбе со взрывами сульфидной пыли на колчеданных рудниках. Центральное бюро технической информации Среднеуральского совнархоза, 1963.
29. Глазкова А.П. Катализ и горение взрывчатых веществ. М., Наука, 1976 - 261 с.

30. Горинов С.А., Маслов И.Ю. Возгорание пылевоздушных смесей под действием ударных воздушных волн при подземной добыче колчеданных руд // ГИАБ. – 2017. - №12 (спец. Выпуск 33). – 24 с.
31. Горное дело: терминологический словарь / Под научной редакцией акад. РАН К.Н. Трубецкого, чл.-корр. РАН Д.Р. Каплунова – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Горная книга», 2016. – 635 с.
32. Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли / под ред. К.Н. Трубецкого / РАН, АГН, РАЕН, МИА. - М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. - 478 с.
33. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
34. ГОСТ Р 12.0.010-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы управления охраной труда. Определение опасностей и оценка рисков.
35. ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность.
36. ГОСТ 14048.8-80 Концентраты цинковые. Метод определения серы.
37. ГОСТ 15934.8-80 Концентраты медные. Методы определения серы.
38. ГОСТ 27.310-95 «Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения».
39. ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность.
40. ГОСТ Р ИСО 31000:2010 (ISO 31000:2009) «Менеджмент риска. Принципы и руководство».
41. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.
42. ГОСТ Р 8.563-96 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики выполнения измерений.
43. Гурин А.А. Управление ударными воздушными волнами при взрывных работах / М.: Недра, 1978. – 80 с.
44. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества // М.: Недра, 1973. - 320 с.
45. Емелин П.В., Сатарова Г.С., Когай Г.Д., Тен Т.Л. Методика оценки уровня опасности предприятий горнодобывающей отрасли // Уголь. - 2012. - № 7. - С. 68-69.
46. Ермолаева А.И., Тетерев Н.А. Анализ исследований в области взрывов пыли и их предупреждения на подземных рудниках // Известия вузов. Горный журнал. - 2015. - №8. - С. 75-80.

47. Жоров Г.А. Излучательная способность металлов. Теплофизика высоких температур, 1967. - № 3, С. 19-21.
48. Зарипова А.К. Методика определения взрывчатости сульфидной пыли в производственных условиях // Уральская горная школа регионам: сб. трудов междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УГГУ, 2015. С. 388.
49. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонация газов // Изд-во: АН СССР. М., 1944. – 69 с.
50. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации // М., ГИТТЛ. – 1955. – 268 с.
51. Зельдович Я.Б., Семенов Н.Н. К теории искрового воспламенения газовых взрывчатых смесей // Журнал физической химии. – 1949. - т.23. - С. 11-14.
52. Зигель Р., Хауэл Д.К. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. – 934 с.
53. Инструкция по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритсодержащие колчеданные руды. Госпроматомнадзор СССР, 1983 г.
54. Инструкция по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритсодержащие колчеданные руды. Госпроматомнадзором СССР, 1991 г.
55. Каплунов Д.Р. Комплексное освоение недр - основное направление проектирования разработки рудных месторождений // ГИАБ. – 2014. - № S1. – С. 347-358.
56. Каплунов Д.Р. Теоретические основы проектирования освоения недр: становление и развитие // Горный журнал. 2014. - № 7. - С. 49– 51.
57. Каплунов Д.Р., Калаева С.З.К., Муратова К.М., Чистяков Я.В. Анализ конструкций пылеуловителей циклонного типа для мелкодисперсной пыли // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. - № 2. - С. 49-71.
58. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Комплексное освоение недр - основное содержание горных наук и образования // ГИАБ. - 2017. - № S1. - С. 165-174.
59. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Условия устойчивого развития минерально-сырьевого комплекса России // ГИАБ. - 2014. - № S1-1. - С. 3-11.
60. Карапетьянц, М.Х. Введение в теорию химических процессов. - М.: Высшая школа, 1981. – 332 с.
61. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. М.: Химия, 1975. – 584 с.
62. Катышев С.Ф., Десятник В.Н., Теслюк Л.М. Определение условий безопасного применения аммиачно-селитренных взрывчатых веществ на сульфидных месторождениях // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – Т.18. - №2. – С. 24-28.

63. Кирпичёв М.В., Михеев М.А., Эйгенсон Л.С. Теплопередача. М., 1949. - 292 с.
64. Ключников В.Ю., Л.В. Дашко, А.В. Довбня, Г.В. Плотникова применение методов термического анализа при производстве пожаро-технических экспертиз // Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. – 2012. – Т.21. - №7. – С. 47-51.
65. Клячко Л.А. Воспламенение совокупности частиц при гетерогенной реакции // Теплоэнергетика. - №8. – 1966. - С. 65-68.
66. Ксенофонтова А.И., Бурчаков А.С. Теория и практика борьбы с пылью в шахтах. М.: Недра, 1965. - 231 с.
67. Кузнецова Д.А., Тетерев Н.А. Анализ способов борьбы со взрывами сульфидной пыли на медноколчеданных рудниках // Уральская горная школа регионам: сб. трудов междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УГГУ, 2015. - С. 391-392.
68. Кутателадзе С.С, Боршианский В.М. Справочник по теплопередаче. М., 1959. - 414 с.
69. Левченко Е.Н., Максимюк И.Е. Минералого-технологические исследования Ni-Cu-Co руды месторождения «Шануч» (Камчатка) / Материалы второго Российского семинара по технологической минералогии «Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья». – Петрозаводск, 2007. – С. 75 – 82.
70. Лидин Г.Д., Пихлак А.А., Матвиенко Н.Г., Ильчук Н.Г. Процессы изменения состава воздуха при добыче, хранении и перевозке сульфидных руд 163 // Москва: Ротапринт сектора физико-технических горных проблем ИФЗ АН СССР. – 1972. - 50 с.
71. Лисицин В.И., Пироженко А.А., Вилюнов В.Н. Горение и взрыв // М.: Наука. - 1972. – 324 с.
72. Матвиенко Н.Г., Воронюк А.С. Основы обеспечения безопасности освоения газоносных и склонных к самовозгоранию рудных месторождений // ГИАБ. – 2012. – №ОВ1. С. 160–171.
73. Мержанов А.Г., Барзыкин В.В., Гонтковская В.Т. Теория теплового взрыва // ДАН СССР. - 1963. - т. 148. - с. 380-385.
74. Методические рекомендации №162. Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленных пород // Утверждено ФНМЦ ВИМС. – Москва, 2012. – 24 с.
75. Методические рекомендации №184. Оптико-петрографический анализ осадочных пород // Утверждено ФНМЦ ВИМС. – Москва, 2015. – 60 с.
76. Методические рекомендации №194. Минераграфическое изучение руд // Утверждено ФНМЦ ВИМС. – Москва, 2018. – 52 с.

77. Митишова Н.А. Геолого-технологическое обеспечение взрывобезопасности при отработке колчеданных месторождений // Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ: сб. научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – Магнитогорск, 2018. - С. 34-38.
78. Митишова Н.А. К вопросу оценки промышленной безопасности подземных горных работ по фактору взрыва сульфидной пыли // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019: сб. статей. – Севастополь: СевГУ, 2019. – с. 1065-1068.
79. Митишова Н.А. Механизм распространения взрывной волны на основе оценки тонкодисперсных аэрозолей в условиях рудников при разработке колчеданных месторождений // Комбинированная геотехнология переход к новому технологическому укладу: Сб. тез. – Магнитогорск: МГТУ, 2019 – с. 80-82.
80. Митишова Н.А. Обеспечение безопасности горных работ по фактору взрывчатости сульфидной пыли // Материалы Международной научно-практической конференции: Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее. 2018. - с. 460-461.
81. Митишова Н.А. Оценка параметров взрывобезопасности убогосульфидных руд при подземной отработке колчеданных месторождений Севера // Наука и инновационные разработки – Северу: II Международная научно-практическая конференция. – Мирный., Издательство, Мирнинская городская типография, 2019. – ч.1 – С. 75-77.
82. МР НСОММИ № 111 «Петрографический анализ магматических, метаморфических и осадочных горных пород».
83. МР НСОММИ №194. Минераграфическое изучение руд.
84. МУ НСОММИ №31. Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ.
85. Нефедова Т. Количественная оценка рисков как критерий устойчивого развития предприятий // Транспортное дело России. – 2010. - № 11. – с. 39-41.
86. Нецепляев М.И., Любимова А.И., Петрухин П.М. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. М.: Недра, 1992. - 298 с.
87. Ноксология: учебник / под общ. ред. Е.Е. Барышева. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. – 162 с.
88. Огиевский В.М., Бухман Я.З. Рудничная вентиляция, освещение и борьба рудничными пожарами – Свердловск, 1958. – 320 с.
89. Огиевский В.М., Шапатын В.А. О воспламеняемости сульфидной пыли при разработке колчеданных руд. Ж.: Цветные металлы. 1934. №8. с.27-34.
90. Осипов М.Н. Предотвратить взрывы сульфидной пыли // Безопасность труда в промышленности. – 1957. - №1. – С.19-21.

91. Параманов Г.П. Повышение безопасности взрывных работ на колчеданных рудниках // Записки Горного института. Т.148 (2). СПГГИ. с.76-84.
92. Параманов Г.П. Предупреждение взрывов сульфидной пыли на колчеданных рудниках // СПб.: СПГГИ, 1999. - 130 с.
93. Параманов Г.П. Физические основы предотвращения взрывов сульфидной пыли на колчеданных рудниках: автореферат дис. ... докт. техн. наук. - Санкт-Петербург, 1999. - 43 с.
94. Параманов Г.П. Физические основы предотвращения взрывов сульфидной пыли на колчеданных рудниках: дис. ... докт. техн. наук. - Санкт-Петербург, 1999. - 282 с.
95. Патент РФ № 2238256, 20.10.2004. Взрывчатое вещество для серных и колчеданных рудников // Параманов Г.П., Миронов Ю.А., Артемов В.А., Чернобай В.И.
96. Пензимонж И.И. Воспламенение сульфидов тяжелых металлов. Алма-Ата: Изд-во АНКазССР, 1959. - 95 с.
97. Петрухин П.М., Нецепляев М.И. др. Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах // М., Недра, 1974. - 304 с.
98. Практика технического перевооружения рудников АО «Евразруда» на самоходное оборудование / Ю.А. Дик, А.В. Котенков, М.С. Танков, В.И. Башков. - Санкт-Петербург: ПервоГрад, 2019. - 400 с.
99. Проблемы комплексного освоения суперкрупных рудных месторождений // Под ред. академика РАН Трубецкого К.Н., чл.-корр. РАН Д.Р. Каплунова. - М.: 2004. - 416 с.
100. Пупков В.В., Маслов И.Ю., Бачурин Л.В., Лебедев С.М., Котяшов В.С., Перепелицын А.И. Оценка химической совместимости промышленных ВВ с разрабатываемыми породами // Безопасность труда в промышленности. — 2004. — № 4. — С. 37-39.
101. Пылевая взрывоопасность горного производства / К.А. Лебецки, С.Б. Романченко. - М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. - 464 с.
102. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания: Пер. с нем. (издание 3-е). М.: Издательство иностранной литературы, 1962. - 1132 с.
103. Ревенко А.Г. Применение стандартных образцов сравнения при рентгенофлуоресцентном анализе геологических проб // Стандартные образцы №4. - 2013. - С. 3-10.
104. Ревенко А.Г. Рентгенофлуоресцентный анализ в геологии: подготовка проб и способы анализа // Вестник Харьков. Национ. Ун-та. 2008. - №16(39). - С. 39-58.

105. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Утв. Ростехнадзором, приказ от 11 апреля 2016 года №144.

106. Рыжков Ф.Н., Ягнышева Л.М., Зиновьева Т.Я., Музафаров Р.М. Способы борьбы с пылью на медноколчеданных рудниках // Труды института Унипромедь. – 1970. - Вып. III. – С. 119-123.

107. Рыльникова М.В., Айнбиндер Г.И., Митишова Н.А., Гаджиева Л.А. Исследование закономерностей возгорания сульфидных руд и пород при комбинированной разработке месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 2. С. 139–155.

108. Рыльникова М.В., Айнбиндер И.И., Митишова Н.А. Анализ условий взрывания сульфидной пыли и способов их предотвращения при ведении горных работ // Материалы Международной научно-практической конференции: 50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли. – М.: ИПКОН РАН, 2017. – С. 316-321.

109. Рыльникова М.В., Митишова Н.А. Методика исследований взрывоопасности убогосульфидных руд при подземной отработке колчеданных месторождений // ГИАБ. – 2019. – № 9. – С. 41–51.

110. Рыльникова М.В., Митишова Н.А. Механизм распространения взрывной волны в условиях подземного рудника при разработке колчеданных месторождений // Комбинированная геотехнология переход к новому технологическому укладу: Сб. статей – Магнитогорск: МГТУ, 2019. - С. 276-281.

111. Рыльникова М.В., Митишова Н.А., Гавриленко В.В. Разработка условий безопасности по фактору воздействия сульфидной пыли на среду обитания в горно-технической системе // Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства: тезисы докладов. – Тула, 2018 – С. 99-105.

112. Рыльникова М.В., Митишова Н.А., Пономарев А.П. К обоснованию нормативно-правовой базы безопасного недропользования при освоении месторождений колчеданных руд // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. - Выпуск 3. – С. 97 – 110.

113. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Митишова Н.А. Исследование условий и механизма взрыва пыле-воздушных смесей в горных выработках при подземной разработке колчеданных месторождений // Материалы всероссийской-научно практической конференции: Научные основы безопасности горных работ. – М: ИПКОН РАН, 2018. – С. 199 – 206.

114. Рысс И.Г., Журавлева Т.Г., Суслов В.Н. О воспламеняемости колчеданных и флотационных хвостов // Химическая промышленность - №6. – 1935. - С. 580-584.

115. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности // М., Изд. АН СССР. - 1958. – 685 с.
116. Семенов Н.Н. Основные вопросы современной теории гомогенного горения однородных газовых систем. М.: Изв. АН СССР, 1953. - №5. – с. 708-729.
117. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция // Углетехиздат. – 1951. – 563 с.
118. Смирнов В.И., Тихонов А.И. Обжиг медных руд и концентратов. Metallurgizdat, 1958. – 282 с.
119. Сперроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Энергия, М., 1971. – 201 с.
120. Субботин А.И. Управление безопасностью труда: уч. пособие для горных вузов. – М.: МГГУ, 2004. – 266 с.
121. Тетерев Н.А. Определение минимальной температуры воспламенения аэрозолей сульфидов // Уральская горная школа регионам: сб. трудов междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УГГУ, 2015. - С. 423.
122. Годес О.М. Голыдикер А.Д., Ионушас К.К. Исследование формирования и развития фронта пламени в аэродисперсных системах. - Физика горения и взрыва, 1974. - т. 10. - № 1. - С. 83-88.
123. Годес О.М. и др. Горение и взрыв. Наука, М., 1972. – 182 с.
124. Топор Н.Д. и др. Термический анализ минералов и неорганических соединений. М.: МГУ, 1987. -190 с.
125. ТР ТС 028/2012 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности взрывчатых веществ и изделий на их основе».
126. Трубецкой К.Н. Проблемы обеспечения экологической безопасности недропользования // Горный журнал. 2003. - №4-5. – С. 3-5.
127. Трубецкой К.Н., Викторов С.Д., Галченко Ю.П., Одинцев В.Н. Техногенные минеральные наночастицы как проблема освоения недр // Вестник Российской академии наук. 2006. - Т. 76. - № 4. - С. 318-324.
128. Трубецкой К.Н., Захаров В.Н., Панфилов Е.И. Актуальные проблемы состояния и перспективы развития минерально-промышленного комплекса России // Маркшейдерия и недропользование. 2017. - № 1 (87). - С. 17-19.
129. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Принципы и научно-методические основы формирования нового технологического уклада устойчивого развития горных предприятий России с подземным способом добычи руд // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. - 2018. - Т. - 5. - № 1. - С. 127-134.
130. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Милкин Д.А. Оценка ресурсного потенциала минерально-сырьевой базы по освоению месторождений медно-колчеданных руд Урала при комплексном

извлечении цветных, редких и благородных металлов // Проблемы техногенного преобразования недр. – М.: ИПКОН РАН, 2007. – С.14-44.

131. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Чаплыгин Н.Н. Современные горные науки: предмет, содержание и новые задачи // Горный журнал, 1994. -№6, - С. 3-7.

132. Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., Айнбиндер И.И., Есина Е.Н. Инициативы ИПКОН РАН по разработке нормативно-правовой документации в области обеспечения экологической и промышленной безопасности горных работ // 50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли. – М.: ИПКОН РАН, 2017. – С. 20-24.

133. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. – 2009. - № 5. - С. 75-81.

134. Умнов Е.А., Голик А.С., Палеев Д.Ю., Шевцов Н.Р. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях. М.: Недра, 1990. - 286 с.

135. Управление промышленной безопасностью: конспект лекций / сост.: П.С. Дрибан – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 61 с.

136. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта», утв. пр. Ростехнадзора от 15 июля 2013 г № 306.

137. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Приказа Ростехнадзора от 21.11.2018 № 580.

138. Федеральный закон от 21 июля 1997 г. N 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

139. Федоров А.В., Федорова Н.Н., Федорченко И.А., Фомин В.М. Математическое моделирование подъема пыли с поверхности // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т.43. - №6. – С. 113-125.

140. Федотенко В.С., Митишова Н.А. Анализ условий и рисков возникновения и развития окислительных процессов в рудах и вмещающих породах при разработке колчеданных месторождений // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Сб. науч. тр. - М., 2019. - С. 223-226.

141. Федотенко В.С., Митишова Н.А. Обоснование механизма распространения взрывной волны как источника возникновения взрыва сульфидной пыли при подземной отработке месторождений колчеданных руд // Решение экологических и технологических проблем горного производства на территории России, ближнего и дальнего зарубежья – материалы Международной научно-практической конференции. – М., 2019. – С. 166-169.

142. Филиппов В.И., Исследование взрывобезопасности полиминеральной сульфидной пыли и предупреждение ее взрывов: дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск, 1976. - 155 с.

143. Чантурия В.А., Трубецкой К.Н., Викторов С.Д., Бунин И.Ж., Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов. – М.: ИПКОН РАН, 2006, - 216 с.
144. Чернобай В.И. Снижение выброса сернистого газа при взрывных работах на колчеданных рудниках // Записки горного института. – 2003. – т. 155, ч. 1. – С. 93-97.
145. Чернявский Э.И. Борьба со взрывами сульфидной пыли на медных рудниках Норанды (Канада) // Цветная металлургия. - 1964. - №15. – С.11-12.
146. Чернявский Э.И., Алешин А.С., Бекчиу В.Н, Захаров В.А. Борьба со взрывами сульфидной пыли при проведении подготовительных выработок. // Труды ин-та Унипромедь. Выпуск IX. – 1966. - С. 108-114.
147. Чернявский Э.И., Алешин А.С., Бекчиу В.Н., Манаков В.Я, Взрывы сульфидной пыли и способы их предупреждения // Труды ин-та Унипромедь. - Выпуск X. – 1967. - С. 89-96.
148. Чернявский Э.И., Бекчиу В.Н. Забойка как основное средство борьбы со взрывами сульфидной пыли при скважинном взрывании // Труды ин-та Унипромедь. Впуск XI, 1969, С. 72-75.
149. Чернявский Э.И., Захаров В.А. Способы фиксирования колчеданной пыли на рудниках // Труды ин-та Унипромедь. – 1963. - Вып. VII. – С. 97-93.
150. Чернявский Э.И., Захаров В.А., Зайцева И.Н., Алешин А.С., Бекчиу В.Н. Изучение взрывчатых свойств сульфидной пыли // Труды ин-та Унипромедь. – 1965. - Вып. VIII. – С. 115-121.
151. Чеховских А.М. Научные основы локализации взрывов газа и пыли в шахтах: дис. ... д-ра техн. наук. Свердловск, 1973. 264 с.
152. Эмануэль Н.М. Цепные реакции. М., Наука. – 1989. – 335 с.