

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**

---

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСиС»**

**ГОРНОСТАЕВ ВАДИМ СЕРГЕЕВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО  
ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ВЗРЫВОВ МЕТАНА И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА  
ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

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

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Геотехнологии  
освоения недр»

**ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»**

**МЕЛЬНИК Владимир Васильевич**

Москва - 2021

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Анализ экономических показателей работы угольных шахт свидетельствует о существенном влиянии на экономические результаты их хозяйственной деятельности человеческого фактора – социального уровня производства, среди показателей которого являются условия и безопасность труда.

Одним из существенных недостатков, применяемых для анализа деятельности угольных предприятий статистических моделей, является отсутствие в них оценки уровня безопасности технологии и организации работ, что не только снижает информативность моделей, но и ограничивает возможность повышения эффективности производства за счет улучшения условий и безопасности труда.

Уровень промышленной безопасности угольных шахт нельзя оценить, как удовлетворительный, так как остается достаточно высоким количество крупных аварий, связанных со взрывом метана и угольной пыли произошедших за последние десятилетия (аварии на шахтах: «Ульяновская» (2007 г.); «Юбилейная» (2007 г.); «Воркутинская» (2007 г.); «Распадская» (2010 г.); «Северная» (2016 г.) и др.)

Наибольшее количество взрывов в угольных шахтах связано с высокой газообильностью и пылеобразующей способностью разрабатываемых угольных пластов, а также неудовлетворительным проветриванием выемочных участков при извлечении угля в высокопроизводительных очистных забоях. Кроме этого, при увеличении глубины разработки стали чаще проявляться негативные горно-геологические и горнотехнические факторы, провоцирующие взрывы в шахте, такие как газодинамические явления и эндогенные пожары, при несовершенстве параметров применяемых технологических схем различных систем разработки угольных месторождений.

В связи с вышеизложенным совершенствование технологических решений по снижению вероятности взрывов и обоснование эффективной области применения, в частности, автоматических систем локализации взрывов в горных выработках, является актуальной научной задачей.

**Целью работы** является разработка технологических решений по снижению вероятности взрывов метана и угольной пыли и обоснование эффективной области применения различных средств локализации взрывов.

**Идея диссертационной работы** состоит в том, что технологические решения по предотвращению взрывов метана и угольной пыли должны базироваться на установлении многофакторной зависимости риска аварий для различных технологических схем систем разработки угольных месторождений.

**Методы исследований включали:** анализ опубликованных научных статей по проблематике безопасной отработки угольных пластов; обобщение производственного опыта ведения горного производства на шахтах, опасных по взрывам угля и газа; анализ крупных аварий на угольных предприятиях России; аналитические исследования распространения фронта пламени в сети горных выработок при взрыве угольной пыли; стендовые испытания автоматических систем локализации взрывов; методы математической статистики обработки результатов исследований.

**Научные положения,** выносимые на защиту:

1. Каждая производственная операция характеризуется определенной величиной трудозатрат, условиями труда, продолжительностью пребывания рабочих в зоне, подверженной влиянию опасных производственных факторов. При этом интенсивность проявления опасного фактора определяется как сумма величин критериев (показателей) опасности в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий таких как: газообильность выемочного участка; удельное пылевыведение пласта; проявление внезапных выбросов угля и газа и эндогенных пожаров.

В качестве критериального показателя безопасности труда любого технологического процесса добычи угля предлагается использовать соотношение производственно необходимых затрат труда, определяемое как доля трудоемкости работ, выполняемых в зоне опасных производственных факторов к ее общей величине.

2. Технологические схемы подготовки выемочных участков, снижающих опасность взрывов метана и угольной пыли в сети горных выработок, должны предусматривать следующие технические решения: в панели должна отрабатываться только одна лава; подготовительные выработки должны отстоять от очистных на расстояние не меньше высоты этажа; конвейерная выработка выемочного участка должна отделяться от магистральной конвейерной выработки гезенком (аккумулирующим бункером); изолирующие вентиляционные сооружения должны быть взрывоустойчивыми.

3. Снижение удельного объема проведения выработок обеспечивает, помимо прямого экономического эффекта, упрощение планировочных решений в пределах шахтных и выемочных полей, благодаря чему сокращается объем проведения подземных транспортных и энергетических коммуникаций, а также улучшаются условия проветривания выработок, что особенно важно для газообильных шахт, чтобы снизить вероятность распространения взрыва метановоздушных смесей и пыли. Наибольшее влияние на удельное проведение выработок оказывают такие технологические факторы, как способ подготовки шахтного поля, система разработки пласта, лавы и длина выемочного поля. При прочих равных условиях наименьший удельный объем проведения выработок достигается при погоризонтном способе подготовки шахтного поля и отработке пласта лавами по восстанию или падению.

4. Технические и технологические требования к автоматической системе локализации взрывов типа АСВП-ЛВ.1М(ПГИ) обеспечивают эффективное подавление сильных взрывов в начальной стадии их развития, скорость распространения фронта пламени которых составляет 340-660 м/с. Технологические схемы расстановки АСВП-ЛВ.1М(ПГИ) определяются параметрами распространения взрывов с учетом характеристики пылевзрывобезопасности горных выработок.

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается:

- удовлетворительной сходимостью результатов прогнозирования возникновения и распространения взрывов в угольных шахтах с реально произошедшими авариями на основе использования математической статистики;
- представительным объемом лабораторных и натурных исследований в производственных условиях;
- положительными результатами испытаний автоматической системы локализации взрывов АСВП-ЛВ.1М(ПГИ) на стендовой базе научно-исследовательских институтов ВостНИИ и КФ ВНИМИ;
- положительными результатами использования технологических схем подготовки и проветривания выемочных участков, устраняющих опасность распространения поражающих факторов взрывов метана и пыли по сети горных выработок.

#### **Новизна основных научных результатов:**

1. Разработаны методические рекомендации прогнозирования возникновения и распространения взрывов в угольных шахтах и установлена зависимость риска аварии от интенсивности проявления опасного производственного фактора, вероятности аварии и ожидаемого ущерба.

2. Разработаны методические рекомендации оценки влияния безопасности работ на эффективность горного производства.

3. Разработаны методические рекомендации определения удельного объема проведения выработок как фактора, способствующего распространению взрыва.

**Научная значимость работы** заключается в установлении многофакторной зависимости риска аварий, связанных со взрывом метана и угольной пыли, для различных технологических схем систем разработки угольных месторождений, а также в разработке методических рекомендаций определения уровня безопасности труда на основе установления критериального показателя безопасности труда любого технологического процесса добычи (очистные работы, подготовительные работы, транспорт и т.п.).

**Практическая значимость работы** заключается: в разработке шести технологических схем подготовки и проветривания выемочных участков, устраняющих опасность распространения взрывов в шахте; в рекомендациях расстановки автоматических систем локализации взрывов по сети горных выработок; в применении эффективных автоматических систем локализации взрывов АСВП-ЛВ.1М(ПГИ) на угольных шахтах России.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы использованы при решении вопросов предупреждения взрывов в сети горных выработок на шахтах «Чертинская-Коксовая» и «Костромовская» Угольной компании «ММК-Уголь». Научно-исследовательским институтом КФ «ВНИМИ» используются результаты исследований при разработке проектов multifunctional систем безопасности угольных шахт Кузбасса.

**Апробация работы.** Основные научные положения, отраженные в диссертационной работе и внедренные на угольных шахтах Кузбасса, докладывались на научных симпозиумах «Неделя горняка» (НИТУ МИСИС, г.Москва) в 2019 и 2020 гг., а также на научных семинарах АО КФ «ВНИМИ» в 2018-2020 гг. и на научно-техническом совете ООО «Геотехнология-Взрывозащита» в 2020 г.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследований, проведении аналитических исследований по установлению риска аварии, связанной со взрывом в шахте, в разработке методических рекомендаций прогнозирования возникновения и распространения взрывов в сети горных выработок и оценки влияния безопасности работ на эффективность горного производства, а также в предложении изменений в конструкцию автоматических систем локализации взрывов АСВП-ЛВ.1М(ПГИ), повышающих их эффективность, а также предложении технологических схем их расстановки и получении основных научных результатов исследований.

**Публикации.** По результатам проведенных исследований, которые представлены в диссертационной работе, опубликовано 5 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа структурно состоит из введения, четырех глав, заключения, девяти приложений и содержит 17 таблиц, 25 рисунков, список использованных источников из 87 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Системы разработки угольных пластов влияют на степень опасности взрывов метана и угольной пыли.

При разработке угольных пластов с высокой метаноносностью система разработки оказывает заметное влияние на газовыделение из разрабатываемого угольного пласта. Это влияние сказывается в меньшей мере на относительной метанообильности выработок, а именно последняя растет по мере увеличения потери угля в целиках, невынимаемых пачках и оставляемого в завале, так как теряемый уголь является дополнительным источником метана, если расчет ведется на тонну добываемого угля.

Основными источниками метана, как фактора взрывов в шахтах являются разрабатываемые угольные пласты, неразрабатываемые пласты и пропластки угля и углистого сланца, породы, вмещающие разрабатываемые пласты, и, в редких случаях, полости природного происхождения, заполненные газом или образовавшиеся вследствие ведения горных работ (полости расслоения пород при смещении их над или под выработанным пространством – так называемые полости Вебера).

Угольная пыль является одним из основных факторов, способствующих распространению взрыва по сети горных выработок в угольной шахте. Многочисленные отечественные и зарубежные исследования показали, что проветривание запыленных горных выработок в комплексе с нормализованным бурением, орошением и другими мероприятиями может быть весьма эффективным средством борьбы с пылью лишь при определенных условиях; несоблюдение их может превратить проветривание из фактора положительного, способствующего уменьшению запыленности, в фактор отрицательный, способствующий ее увеличению, что в свою очередь увеличивает риск взрыва пыли в сети горных выработок шахты.

При разработке газоносных месторождений угля в шахтах выделяется метан, образующий с рудничным воздухом взрывчатую газовоздушную смесь и заполняющий выработки до такой степени, что содержание кислорода в рудничной атмосфере снижается до опасных концентраций. Характер выделения метана из различных его источников в шахтах неодинаков. В одних случаях газовыделение носит интенсивный характер, а в других – происходит спокойно без динамичных процессов. В зависимости от интенсивности газовыделения называют обычными и необычными. Обычные газовыделения происходят при технологических процессах добычи угля постоянно и сравнительно монотонно, их локализация осуществляется за счет вентиляции. К непредвиденным выделениям метана относятся суфляры, прорывы метана из разломов пород и внезапные выбросы, которые принято называть газодинамическими явлениями.

Газодинамическое явление, в виде внезапного выделения метана в выработанном пространстве очистного забоя, и в призабойное пространство лавы 412-з пласта «Мощный» СП «Шахта Северная» АО «Воркутауголь», из-за разрушения почвы пласта при обрушении зависшей основной кровли, привело к аварии, связанной со взрывом метана и угольной пыли в результате разрушения силового кабеля при динамическом отжиге угольного пласта.

Зависание кровли и динамические проявления при ее обрушении подтверждены данными систематического мониторинга GITS (Geo info Trans System) АО «ВНИМИ».

Эндогенный пожар является опасным фактором, провоцирующим взрыв метановоздушной смеси, особенно в выработанном пространстве очистного забоя, что подтверждается проведенными исследованиями аварии, произошедшей на шахте «Распадская» 10.05.2010 года, в лаве 5а-6-18. Вероятным источником высокой температуры в выработанном пространстве лавы 5а-6-18 являлся переориентированный пожар из выработанного пространства лавы 5а-7-26 или выработанного пространства лавы 5а-6-16, где по данным поверхностных радоновых съемок 10.11.2006 г. регистрировалось самонагревание угля.

Рациональная технология ведения горных работ на мощных самовозгорающихся и газообильных пологих и наклонных пластах в сложных горно-геологических условиях по условиям безопасности и исключения взрыва метана должна обеспечивать: сокращение до минимума эксплуатационных потерь угля в недрах; управляемое проветривание выработанного пространства, исключающего опасные скопления в нем метана; надежную изоляцию выработанного пространства от действующих выработок и в случае возникновения эндогенного пожара, возможность его локализации и исключения из общей сети проветриваемых выработок.

При панельном и этажном способах отработки угольных пластов, опасных по эндогенным пожарам, подготовку, как правило, необходимо осуществлять односторонними панелями (выемочными полями) при проведении бремсбергов (уклонов) и фланговых ходков по пласту. Подготовка двухсторонними панелями (выемочными полями) допускается при оставлении между сторонами панели (выемочного поля) непрорезаемого целика угля, исключающего возможность аэродинамической связи между ними в течение всего срока отработки панели.

Предотвращение аварий, связанных со взрывом метана и угольной пыли должно базироваться на оценке риска возможных аварий для различных систем разработки угольных пластов.

Риск возникновения аварии, связанной со взрывом метановоздушной смеси и угольной пыли в сети горных выработок угольной шахты зависит от многочисленных факторов, к которым можно отнести горно-геологические условия, горнотехнические условия разработки месторождения и организационно-субъективные факторы в определенном месте шахты и в определенный промежуток времени.

Вероятность возникновения аварии устанавливается безотносительно к переменным, определяющим соответствующие корректировки технологических схем разработки и изменения технических параметров различных систем разработки угольных месторождений.

Соответствующий прогноз аварий, связанных со взрывом, т.е. определение характерной величины потенциальной опасности позволит выполнить соответствующие профилактические мероприятия и тем самым снизить материальные потери и человеческие жертвы при взрыве в шахте. Большинство отечественных и зарубежных специалистов рассматривают риск, как произведение вероятности наступления аварии ( $P_a$ ) на математическое ожидание ущерба ( $M_o$ ) от аварии, т.е.:

$$R = P_a \cdot M_o \quad (1)$$

При этом, под вероятностью понимают частотную характеристику наступления аварии, при этом она является безразмерной величиной.

Учитывая то, что объективно определить ущерб от возможной аварии, а также спрогнозировать, т.е. установить вероятность аварии того или иного рода практически невозможно, многие специалисты используют экспертные оценки, статистические данные об авариях и ущербе и выражают их в балльных оценках, и по их численному значению классифицируют уровень риска того или иного производственного фактора.

При разработке методики оценки риска аварии нами учитывались следующие допущения (положения):

- риск аварии сохраняется даже при соблюдении требований безопасности рабочим персоналом;
- риск материального ущерба и наличия жертв при аварии имеет место быть;
- для оценки риска аварии исследовалась интенсивность проявления основных опасных факторов, прежде всего аэрологического риска, связанного с газообильностью выемочного участка и пылевзрывоопасностью пласта;
- общая степень риска аварии должна определяться из реальных величин риска по каждому опасному техническому или технологическому фактору;
- риском аварии можно управлять, т.е. необходимо понижать или устранять все негативные факторы, которые могут привести к взрыву в шахте.

Оценка риска аварии ( $R_a$ ) базируется на трех параметрах: интенсивности проявления опасного производственного фактора ( $\alpha$ ); вероятностного критерия аварии ( $P_k$ ) и ожидаемого ущерба ( $M_o$ ).

Каждый параметр оценивается величиной от 1 до 10 баллов, на основании статистических данных об авариях в угольных шахтах при использовании различных систем разработки, экспертных оценок специалистов и шахтных исследований негативных, прежде все аэрологических факторов. На основании вышеизложенного, риск аварии можно определить по зависимости:

$$R_a = \alpha \cdot P_k \cdot M_o, \quad (2)$$

где  $\alpha = 2,5 \cdot (k_r + k_{\pi} + k_b + k_3)$ .

$k_r$  – критерий (показатель) опасности в зависимости от газообильности выемочного участка:

$$k_{\Gamma} = \frac{M_i}{M_{\max}}; \quad (3)$$

$M_i$  – код группы выемочных участков по относительной газообильности;

$i$  – переменная ( $i = 1 \div 4$ ) представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Критерий (показатель) опасности по метанообильности

| Степень опасности | Значение показателя опасности (относительная метанообильность, м <sup>3</sup> /т) | Код ( $M_i$ ) | Критерий (показатель) опасности, $k_{\Gamma}$ |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------|
| I                 | до 5                                                                              | 1             | 0,25                                          |
| II                | от 5 до 10                                                                        | 2             | 0,5                                           |
| III               | от 10 до 15                                                                       | 3             | 0,75                                          |
| Сверхкатегорная   | более 15                                                                          | 4             | 1,0                                           |

$k_{\Pi}$  – критерий (показатель) опасности по удельному пылевыведению пласта:

$$k_{\Pi} = \frac{\Pi_i}{\Pi_{\max}}; \quad (4)$$

$\Pi_i$  – код группы пылеобразующей способности пласта;

$i$  – переменная ( $i = 1 \div 8$ ) представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Критерий (показатель) опасности по удельному пылевыведению пласта

| Степень опасности угольного пласта | Значение показателя опасности (удельное пылевыведение пласта, м <sup>3</sup> /т) | Код ( $\Pi_i$ ) | Критерий (показатель) опасности, $k_{\Pi}$ |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|
| Малопыльные                        | до 50 (I)                                                                        | 1               | 0,125                                      |
|                                    | 50-100 (II)                                                                      | 2               | 0,25                                       |
| Средней пыльности                  | 100-150 (III)                                                                    | 3               | 0,375                                      |
|                                    | 150-250 (IV)                                                                     | 4               | 0,5                                        |
| Пыльные                            | 250-400 (V)                                                                      | 5               | 0,625                                      |
|                                    | 400-700 (VI)                                                                     | 6               | 0,75                                       |
| Весьма пыльные                     | 700-1200 (VII)                                                                   | 7               | 0,875                                      |
|                                    | более 1200 (VIII)                                                                | 8               | 1,0                                        |

$k_{\text{в}}$  – критерий (показатель) опасности в зависимости от наличия опасности внезапных выбросов угля и газа, при наличии этой опасности  $k_{\text{в}} = 1$ ;

$k_{\text{з}}$  - критерий (показатель) опасности в зависимости от наличия опасности по эндогенным пожарам, при наличии этой опасности  $k_{\text{з}} = 1$ .

Вероятность возникновения аварийных ситуаций, связанных со вспышками (взрывами) газа и пыли по сети горных выработок шахт (см. Приложение 5) составляет от  $11,2 \cdot 10^{-4}$  до  $523,9 \cdot 10^{-4}$ . При оценке вероятности взрыва по десятибалльной системе можно воспользоваться данными приведенными в таблице 3.

Таблица 3 – Вероятностный критерий взрыва по десятибалльной системе

| Вероятность взрыва, как безразмерная величина, $P$ | Показатель вероятности взрыва, по десятибалльной шкале, $P_k$ |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| менее $10 \cdot 10^{-4}$                           | 1                                                             |
| от 10 до $50 \cdot 10^{-4}$                        | 2                                                             |
| от 50 до $150 \cdot 10^{-4}$                       | 3                                                             |
| от 150 до $200 \cdot 10^{-4}$                      | 4                                                             |
| от 200 до $250 \cdot 10^{-4}$                      | 5                                                             |
| от 250 до $300 \cdot 10^{-4}$                      | 6                                                             |
| от 300 до $350 \cdot 10^{-4}$                      | 7                                                             |
| от 350 до $400 \cdot 10^{-4}$                      | 8                                                             |
| от 400 до $500 \cdot 10^{-4}$                      | 9                                                             |
| более $500 \cdot 10^{-4}$                          | 10                                                            |

Ожидаемый ущерб по десятибалльной системе можно определить в зависимости от стадии развития взрыва, в зависимости от избыточного давления на фронте ударно-воздушной волны, и скорости распространения фронта пламени, который представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Ожидаемый ущерб по десятибалльной системе в зависимости от стадии взрыва

| Избыточное давление на фронте ударно-воздушной волны, МПа | Скорость распространения фронта пламени, м/с | Ожидаемый ущерб по десятибалльной шкале, $M_o$ |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| менее 0,01                                                | менее 1,0                                    | 1                                              |
| 0,01 – 0,02                                               | 1,0 – 40                                     | 2                                              |
| 0,02 – 0,06                                               | 40 – 100                                     | 3                                              |
| 0,06 – 0,15                                               | 100 – 250                                    | 4                                              |
| 0,15 – 0,3                                                | 250 – 340                                    | 5                                              |
| 0,3 – 0,65                                                | 340 – 660                                    | 6                                              |
| 0,65 – 1,0                                                | 660 – 1000                                   | 7                                              |
| 1,0 – 1,5                                                 | 1000 – 1500                                  | 8                                              |
| 1,5 – 1,7                                                 | 1500 – 2000                                  | 9                                              |
| более 1,7                                                 | 2000 – 2500                                  | 10                                             |

Максимальное количество баллов, при классификации уровней риска аварий в шахте, составит 1000 баллов. В зависимости от количества баллов можно классифицировать уровни риска аварий, которые представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Классификация уровней риска аварий, связанных со взрывом метана и угольной пыли

| Класс риска аварий | Уровень риска аварий | Численные значения риска, баллы |
|--------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1                  | - незначительный     | менее 25                        |
| 2                  | - умеренный          | 25 – 100                        |
| 3                  | - существенный       | 100 – 400                       |
| 4                  | - высокий            | 400 – 650                       |
| 5                  | - предельно высокий  | 650 – 1000                      |

В соответствии с разработанной методикой была проведена оценка риска аварии, связанной со взрывом метана и угольной пыли для различных технологических схем разработки угольных месторождений и определением наиболее опасных мест, т.е. очагов взрыва.

Анализ экономических показателей работы угольных шахт свидетельствует о существенном влиянии на экономические результаты их хозяйственной деятельности человеческого фактора – социального уровня производства, среди показателей которого важнейшими являются условия и безопасность труда.

Оценка уровня безопасных условий труда является одним из сложных и важных вопросов в определении показателей технико-экономического уровня предприятия и его эффективности. Методические рекомендации для определения уровня этого показателя отличаются как методологическими подходами, так и номенклатурой учитываемых факторов, что обусловлено многофакторностью производственной среды.

Для оценки состояния техники безопасности разработана методика, учитывающая возможность сочетания всех вариантов технологических операций в рабочем процессе конкретной технологической схемы, поскольку технологические схемы имеют значительные различия по составу и количеству технологических процессов и операций, характеру и состоянию безопасных условий труда.

Исходя из этого, представляется возможным предложить в качестве критериального показателя безопасности труда любого технологического процесса добычи угля (очистные работы, подготовительные работы, транспорт угля и горной массы) соотношение необходимых затрат труда, определяемое как доля трудоемкости работ, выполняемых в зоне влияния опасных производственных факторов, способных привести к крупным авариям, к ее общей величине.

Количественное значение такого показателя может быть определено по зависимости:

$$\gamma_{y.б.} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \overline{\varphi}_i \overline{T}_j \left( \sum_{j=1}^{N_1} T_j \right)^{-1} \prod_{i=1}^{n_1} (1 \pm \Delta x_i), \quad (5)$$

где  $\overline{\varphi}_i$  – показатель значимости  $i$ -го опасного производственного фактора при выполнении  $j$ -ой рабочей операции в базовом (эталонном) варианте технологии, исчисленный по статистическим данным или на основе экспертных оценок, доли ед.;

$\overline{T}_j$  – трудоемкость  $j$ -ой операции в базовом варианте технологии, чел/мин/ед. работы;

$T_j$  – трудоемкость  $j$ -ой операции в проектируемом варианте технологии, чел/мин/ед. работы;

$n, n_1$  – количество опасных производственных факторов, наблюдаемых при выполнении рабочих операций в базовом и проектируемом вариантах технологии;

$N, N_1$  – количество рабочих операций при базовом и проектируемом вариантах технологии данного рабочего процесса;

$\Delta x_i$  – поправочные коэффициенты, учитывающие особенности проектируемой технологии при оценке показателя уровня безопасности, доли ед. Числовые значения этих коэффициентов определяются по процессным корреляционным зависимостям, установленным по фактическим данным, или методами, применяемыми в планировании эксперимента.

Предлагаемый показатель в соответствии с зависимостью (1) может быть применен для оценки уровня безопасности рабочего процесса, технологической схемы, оценки влияния уровня безопасности работ на фактическую трудоемкость и стоимость производственного процесса при его техническом перевооружении.

Анализ взрывов метана и угольной пыли за период с 1990 по 2020 гг. показывает, что вентиляционные сооружения, обеспечивающие распределение воздуха на выемочном участке, в

большинстве случаев (65%) разрушаются ударной волной вследствие их низкой механической прочности.

При разрушении шлюзов и изменении направления (опрокидывании) вентиляционных струй в выработках продукты взрыва попадают в выработки со свежими струями воздуха. В ряде случаев поражающие факторы взрыва (ядовитые газы и пламя) попадают в тупиковые выработки подготавливаемого горизонта.

В литературе имеются предложения по схемам подготовки, снижающим опасность распространения поражающих факторов взрывов. Однако из-за сложности рекомендованных технических решений, основные схемы не нашли применения в шахтах.

На основании ранее выполненных исследований можно сформулировать следующие принципы разработки схем подготовки и проветривания выемочных участков:

1. Все крупные взрывы (с разрушением выработок на большом протяжении) происходили в тупиковых выработках с участием угольной пыли. Взрывы произошли на платах с выходом летучих веществ более 28%. Из этого следует, что тупиковые выработки, проводимые по пластам с выходом летучих веществ более 28%, необходимо оснащать устройствами (вентиляционными сооружениями), предотвращающим распространение ударной волны и продуктов взрыва на соседние выработки.

2. Все случаи крупных взрывов угольной пыли произошли в выработках с конвейерным транспортом. Большая протяженность зоны распространения ударной волны обусловлена отсутствием технологических разрывов в конвейерных линиях, которые бы предотвращали распространение поражающих факторов взрыва.

Это обстоятельство дает основание считать, что конвейерная линия тупиковой выработки в схеме подготовки должна отсоединяться от магистральной конвейерной линии гезенком (аккумулирующим бункером).

3. Крупные аварии на выемочных участках происходили при высокой концентрации горных работ. Исходя из этого, в схемах подготовки необходимо предусматривать следующие технические решения:

- в панели, блоке должна, как правило, отрабатываться только одна лава.
- подготовительные выработки должны отстоять от очистных на расстояние, не меньшее высоты этажа.
- конвейерная выработка выемочного участка должна отделяться от магистральной конвейерной выработки гезенком (аккумулирующим бункером).
- вентиляционные сооружения на выемочных участках, разрушение которых может привести к попаданию продуктов взрыва в выработки других участков, должны быть взрывоустойчивыми.

С учетом перечисленных технических решений рекомендуется шесть схем подготовки и проветривания выемочных участков: четыре схемы при панельном способе подготовки и две - погоризонтном.

Схема подготовки и проветривания № 1 представлена на рисунке 1.

Соответствует панельному способу подготовки и прямоточной схеме проветривания с подсыжением исходящей вентиляционной струи со стороны массива угля и отводом исходящей вентиляционной струи на фланговую выработку.

В панели отрабатывается одна лава и проходится одна тупиковая выработка в одном и том же крыле.

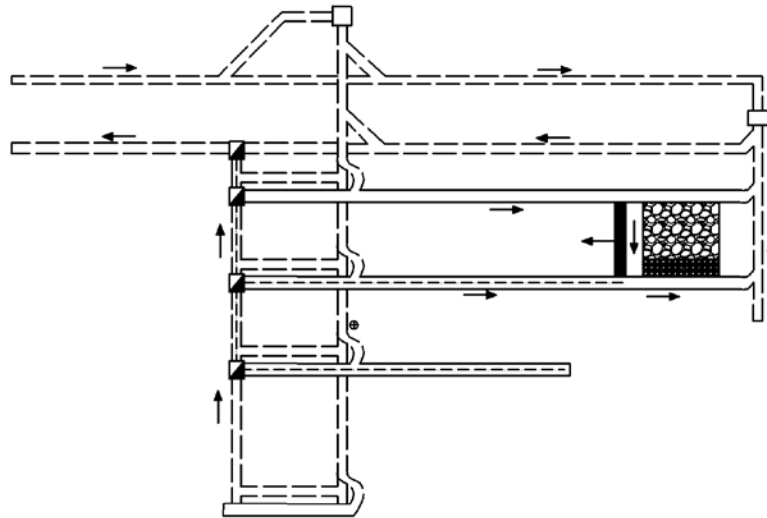


Рисунок 1 - Схема подготовки и проветривания выемочного участка № 1

В выработке с подсвежающей вентиляционной струей выемочного участка устанавливается шлюз-регулятор расхода воздуха повышенной устойчивости.

В заезде на тупиковую выработку устанавливается перемычка повышенной устойчивости с открытыми дверями. Сопряжение заезда уклона со штреком разворачивается в сторону уклонов для уменьшения воздействия ударной волны.

Схема подготовки и проветривания № 2 аналогична схеме № 1 и предназначена для бремсберговой части шахтного поля.

Схема подготовки и проветривания № 3 представлена на рисунке 2.

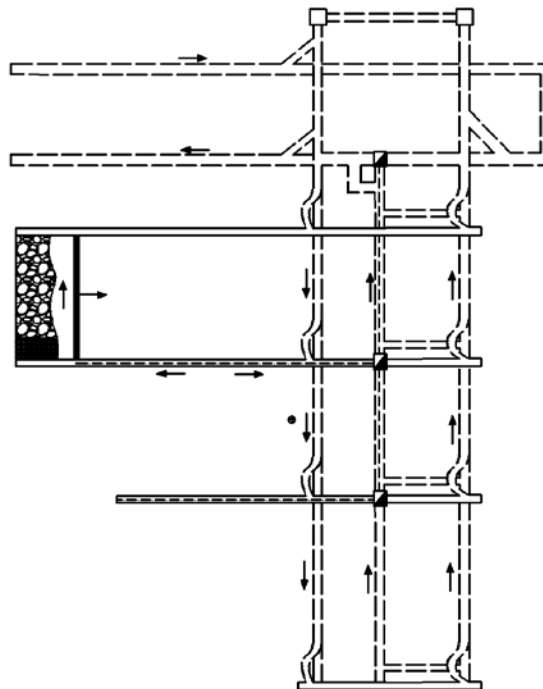


Рисунок 2 - Схема подготовки и проветривания выемочного участка № 3

Соответствует панельному способу подготовки и возвратноточной схеме проветривания выемочного участка.

В панели отрабатывается одна лава и проходится одна тупиковая выработка в одном и том

же крыле.

В заезде на тупиковую выработку устанавливается перемычка повышенной устойчивости с открытыми дверями. Сопряжение заезда уклона со штреком разворачивается в сторону уклонов для уменьшения воздействия ударной волны.

Схема подготовки и проветривания № 4 аналогична схеме № 3 и применяется при проведении тупиковых выработок в другом крыле шахтного поля, чем очистные выработки.

Схема подготовки и проветривания № 5 представлена на рисунке 3.

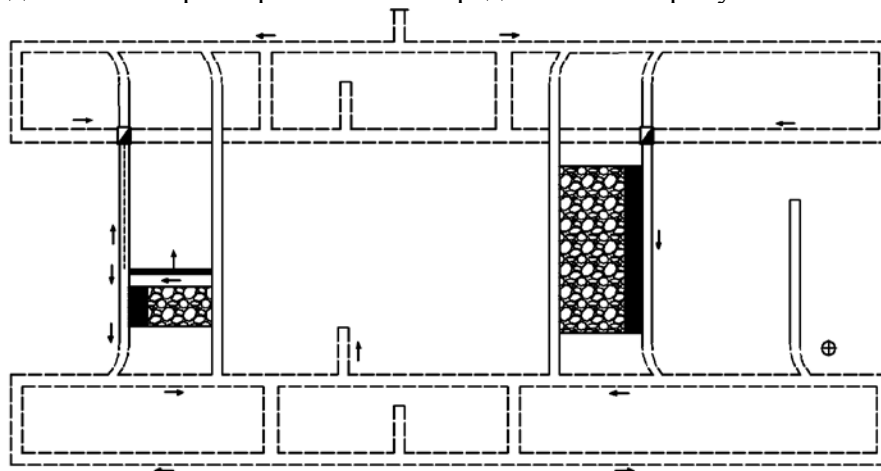


Рисунок 3 - Схема подготовки и проветривания выемочного участка № 5

При погоризонтном способе подготовки и прямоточной схеме проветривания выемочного участка.

В блоке в разных крыльях шахтного поля отрабатывается одна лава и проходится одна тупиковая выработка.

Для уменьшения воздействия ударной волны устье тупиковой выработки разворачивается в сторону, противоположную лавам.

Разновидностью этой схемы является схема № 6, которая характеризуется тем, что отрабатывается две лавы в разных крыльях шахтного поля.

Удельный объем проведения выработок является одним из основных показателей технического уровня горных работ. При сбалансированных объемах добычи угля и проведения подготовительных выработок для воспроизводства фронта очистных забоев технический уровень горных работ на шахте тем выше, чем ниже указанный показатель. Снижение удельного объема проведения выработок обеспечивает, помимо прямого экономического эффекта, упрощение планировочных решений в пределах шахтных и выемочных полей, благодаря чему сокращается объем проведения подземных транспортных и энергетических коммуникаций, а также улучшаются условия проветривания выработок, что особенно важно для газообильных шахт, чтобы снизить вероятность распространения взрыва метановоздушных смесей и пыли.

Статистическая обработка фактических данных за последние годы по шахтам основных угольных бассейнов показала, что наибольшее влияние на удельное проведение выработок оказывают такие технологические факторы, как способ подготовки шахтного поля, система разработки пласта, лавы и длина выемочного поля. При прочих равных условиях наименьший удельный объем проведения выработок достигается при погоризонтном способе подготовки шахтного поля и отработке пласта лавами по восстанию или падению.

Исследованиями, проведенными в ИГД им. А.А. Скочинского, ДонУГИ, КНИУИ, ПечорНИИпроекте, установлено, что при погоризонтном способе достигается существенное уменьшение по сравнению с панельным и этажным способами объемов работ по проведению как основных, так и выемочных (т.е. примыкающих к очистному забою) выработок.

Погоризонтный способ подготовки не требует трудоемкого и отнимающего много времени проведения комплекса основных наклонных выработок (уклонов, бремсбергов) с большим числом сложных по конструкции приемных площадок, благодаря чему объем этих выработок снижается более чем в 3,5 раза. С учетом несколько большей протяженности главных штреков, проводимых, как правило, полевыми, общая длина основных подготовительных выработок при погоризонтной подготовке примерно на 10% меньше, чем при панельной.

Суммарная длина выработок, примыкающих к очистному забою, при погоризонтной подготовке также меньше, чем при других способах. Это можно показать следующими расчетами для части ступени шахтного поля наклонной высотой  $H_{\text{п}}$  и длиной по простиранию  $S_{\text{п}}$ . Суммарная длина выработок, примыкающих к очистному забою, в рассматриваемой части шахтного поля составит:

при панельной подготовке (ярусные штреки) –

$$L_{\text{я.ш}} = S_{\text{п}} \left( \frac{H_{\text{п}}}{l_{\text{л}}} + 1 \right) = \frac{S_{\text{п}} H_{\text{п}}}{l_{\text{л}}} + S_{\text{п}}; \quad (6)$$

при погоризонтной подготовке (ходки) –

$$L_{\text{х}} = H_{\text{п}} \left( \frac{S_{\text{п}}}{l_{\text{л}}} + 1 \right) = \frac{S_{\text{п}} H_{\text{п}}}{l_{\text{л}}} + H_{\text{п}}, \quad (7)$$

где  $l_{\text{л}}$  – длина лавы, м.

В случае одинаковой длины лавы

$$L_{\text{я.ш}} - L_{\text{х}} = S_{\text{п}} - H_{\text{п}}. \quad (8)$$

На практике обычно  $S_{\text{п}} > H_{\text{п}}$ , следовательно, приведенная разница значений длины всегда положительна. Для наиболее характерного случая, когда  $H_{\text{п}} = \frac{1}{2} S_{\text{п}}$  (длина выемочного столба при обоих способах подготовки шахтного поля одинакова), получим:

$$L_{\text{я.ш}} - L_{\text{х}} = \frac{1}{2} S_{\text{п}}. \quad (9)$$

При длине шахтного поля по простиранию  $S_{\text{ш}}$  суммарная длина ходков в пределах одной ступени при погоризонтной подготовке будет меньше суммарной длины ярусных штреков при панельной подготовке на величину, равную

$$\sum (L_{\text{я.ш}} - L_{\text{х}}) = \frac{S_{\text{ш}}}{S_{\text{п}}} \frac{1}{2} S_{\text{п}} = \frac{1}{2} S_{\text{ш}}. \quad (10)$$

В таблице 6 приведены расчетные удельные объемы проведения выработок при различных вариантах панельной и погоризонтной подготовки в уклонной части ступени шахтного поля.

Как видно, в случае прямоточного проветривания при погоризонтной подготовке эти объемы в 1,23 раза меньше, чем при панельной. Следует, однако, отметить, что область применения погоризонтного способа ограничивается углом падения пласта (не более 10-12°), водообильностью очистного забоя (при работе по падению не более 5 м³/ч) и мощностью пласта (при работе по восстанию не более 1,8-2,0 м).

Существенное влияние на удельные объемы проведения выработок оказывает система разработки, особенно мощных крутых и наклонных пластов. Применяемые в настоящее время варианты комбинированных систем разработки с гибким перекрытием (КГП), поперечно-наклонными слоями, подэтажными штреками с обрушением и др. характеризуются весьма большим объемом выработок и в связи с низким техническим уровнем не перспективны.

Таблица 6 – Удельный объем проведения выработок для различных способов подготовки шахтного поля

| <b>Способ подготовки шахтного поля</b>       | <b>Способ подготовки выемочных столбов</b> | <b>Порядок отработки столбов в панели или шахтном поле</b> | <b>Схема проветривания выемочного участка</b> | <b>Число лав в крыле шахтного поля</b> | <b>Удельный объем проведения выработок, м/1000 т</b> |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Панельный                                    | Повторно используемыми штреками            | Последовательный сверху вниз                               | Прямоточная                                   | 2                                      | 6,90                                                 |
| То же                                        | Присечными штреками                        | То же                                                      | Возвратноточная                               | 2                                      | 9,12                                                 |
| Погоризонтный при работе лавами по восстанию | Повторно используемыми ходками             | Последовательный от центра шахтного поля                   | Прямоточная                                   | 1                                      | 5,62                                                 |
| То же                                        | То же                                      | Последовательный от середины крыла шахтного поля           | То же                                         | 2                                      | 5,55                                                 |
| «»                                           | Присечными ходками                         | Последовательный от центра шахтного поля                   | Возвратноточная                               | 1                                      | 8,89                                                 |
| «»                                           | То же                                      | Через два столба                                           | То же                                         | 2                                      | 8,96                                                 |

Что касается технологии выемки пологих пластов, то здесь преобладает система разработки длинными столбами, предопределяющая примерно одинаковый в сопоставимых условиях удельный объем проведения выработок, зависящий в основном от способа подготовки выемочных столбов. Наиболее предпочтительными являются варианты системы разработки длинными столбами по простиранию или по восстанию (падению), предусматривающие подготовку выемочных столбов с помощью повторно используемых выработок, при которых объем проведения ярусных штреков или ходков сокращается более чем в 1,5 раза. В настоящее время данная технология широко применяется при разработке тонких и средней мощности пластов с породами кровли не ниже средней устойчивости.

Как показал анализ, длина очистного забоя является одним из наиболее важных технологических факторов, влияющих на удельный объем проведения выработок. С увеличением длины лавы пропорционально снижается удельный объем проведения выемочных выработок – ярусных и промежуточных штреков, ходков. Наивыгоднейшей является длина лавы, при которой достигается минимум зависящих от нее эксплуатационных затрат, хотя это значение длины лавы и не соответствует минимуму удельного объема проведения выработок.

Главной целью локализации взрывов метана и угольной пыли является максимальное ограничение области распространения фронта пламени (ФП) по сети горных выработок. Эта цель достигается на основе применения в угольных шахтах пассивных сланцевых или водяных заслонов, а также автоматических систем локализации взрывов.

Сланцевые заслоны имеют длину не менее 20 м и состоят из специальных полок, монтируемых поперек выработки, на которых помещается инертная пыль из расчета 400 кг на 1 м<sup>2</sup> сечения выработки в свету. Они устанавливаются в выработках с углом наклона до 18°.

Водяные заслоны имеют длину также не менее 20 м и состоят из специальных полок, монтируемых поперек выработки, на которых в специальных жестких пластиковых сосудах емкостью не более 80 л помещается жидкость из расчета 440 л на 1 м<sup>2</sup> сечения выработки в свету.

Автоматические системы локализации взрывов устанавливаются под кровлей выработки и снаряжаются специальными огнетушащими порошками («Виксан», «Оберег», «ПАГС» и др.), с массой не менее 25 кг и инерционностью срабатывания не более 50 мс.

Нами разработаны методические рекомендации определения параметров взрыва угольной пыли для оценки эффективности применения систем локализации взрывов.

Анализ многочисленных исследований показал, что распространение фронта пламени происходит в режиме пульсаций.

Выделим две зоны взрыва: первая длиной до 40 м, в которой заметно влияние источника воспламенения метана, а вторая зона – это участок распространения взрыва длиной до 300 м.

Скорость фронта пламени определяется по зависимости:

$$dV = V_0 \frac{dk}{k_0}, \quad (11)$$

где  $V$  – скорость фронта пламени, м/с;  $V_0$  – скорость ФП, когда взрыв еще возможен, м/с;

$k$  – концентрация пыли, г/м<sup>3</sup>;  $k_0$  – минимальная концентрация пыли способная взрываться, г/м<sup>3</sup> ( $k_0 = 30$  г/м<sup>3</sup>).

Интегрирование уравнения (11) дает зависимость определения скорости распространения ФП:

$$V = V_0 \ln(k/k_0) \quad (12)$$

Зависимость (12) можно записать для средней скорости распространения пламени в зоне I.

$$V_{CP} = V_0 \ln(k_3/k_0) \quad (13)$$

где  $k_3$  – концентрация пыли при эксперименте.

При выборе схем расстановки автоматических средств локализации взрывов следует основываться на максимально возможных значениях скорости ФП в зоне I

$$(14) \quad V_{MAX(I)} = 2V_{CP} - V_0$$

Для горной выработки сечением  $S_b = 15 \text{ м}^2$ :

$$V_{MAX(I)} = 2 \cdot 163 - 57,6 = 268 \text{ м/с}$$

Зависимость для определения максимальной скорости распространения ФП во II -й зоне:

$$V_{MAX(II)} = V_{MAX(I)} + \left( \frac{L}{L_{\Pi}} - 1 \right) \frac{V_0}{2} \quad (15)$$

где  $L$  – расстояние от места взрыва, м ( $L = nL_{\Pi}$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

Для горной выработки сечением  $S_b = 15 \text{ м}^2$  на расстоянии  $L = 180 \text{ м}$ :

$$V_{MAX(II)} = 268 + \left( \frac{180}{30} - 1 \right) \frac{57,6}{2} = 412 \text{ м/с}$$

Следовательно, при выборе системы АСВП-ЛВ.1М(ПГИ) она должна подавлять взрыв распространяющийся со скоростью ФП не менее 412 м/с.

Поэтому, зная концентрацию отложившейся угольной пыли в шахте, возможно установить вероятную скорость распространения ФП в горной выработке и, таким образом, выявить эффективную область применения АСВП-ЛВ.1М(ПГИ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором исследований решена актуальная научно-практическая задача обоснования технологических решений по снижению вероятности взрывов метана и угольной пыли и обоснована эффективная область применения пассивных (сланцевых и водяных) заслонов, а также автоматических систем локализации взрывов типа АСВП-ЛВ.1М(ПГИ) и технологических схем их расстановки по сети горных выработок шахты.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Системы разработки угольных пластов влияют на степень опасности взрывов метана и угольной пыли.

Основными источниками метана, как фактора взрывов в шахтах, являются разрабатываемые угольные пласты и их спутники, а также вмещающий массив горных пород, в частности, полости расслоения массива пород при смещении их над или под выработанным пространством - так называемые полости Вебера.

Наличие угольной пыли способствует распространению взрыва в сети горных выработок. Взрывы пылевоздушных смесей, как правило, приводят к значительным разрушениям выработок и большому количеству жертв при авариях.

2. Исследование горно-геологических и горнотехнических факторов, влияющих на взрыв в шахте, на основе анализа крупных аварий, произошедших на шахтах России (ш. «Северная» АО «Воркутауголь» и ш. «Распадская») показали, что наиболее опасным являются газодинамические явления, прежде всего выбросы угля и газа, а также эндогенные пожары в выработанном пространстве выемочных участков.

3. Разработаны методические рекомендации прогнозирования возникновения и распространения взрывов в угольных шахтах.

4. Проведен риск-анализ аварий, связанных со взрывом в шахтах, для различных технологических схем разработки угольных месторождений и предложена расчетная зависимость оценки риска аварий.

Риск возникновения аварии, связанной со взрывом метановоздушной смеси и угольной пыли в сети горных выработок угольной шахты зависит от: горно-геологических условий, горнотехнических условий и организационно-субъективных факторов. Вероятность возникновения аварии устанавливается безотносительно к переменным, определяющим соответствующие корректировки технологических схем разработки и изменения технических параметров различных систем разработки угольных месторождений.

5. Разработаны методические рекомендации оценки влияния безопасности работ на эффективность горного производства. Оценка уровня безопасных условий труда является одним из сложных и важных вопросов в определении показателей технико-экономического уровня предприятия и его эффективности. Методические рекомендации для определения уровня этого показателя отличаются как методологическими подходами, так и номенклатурой учитываемых факторов, что обусловлено многофакторностью производственной среды. Для оценки состояния техники безопасности разработана методика, учитывающая возможность сочетания всех вариантов технологических операций в рабочем процессе конкретной технологической схемы, поскольку технологические схемы имеют значительные различия по составу и количеству технологических процессов и операций, характеру и состоянию безопасных условий труда.

6. Разработано шесть технологических схем подготовки и проветривания выемочных участков, устраняющих опасность распространения поражающих факторов взрывов метана и пыли по сети горных выработок: четыре схемы при панельном способе подготовки и две – погоризонтном.

7. Удельное проведение выработок является одним из основных показателей технического уровня горных работ. При сбалансированных объемах добычи угля и проведения подготовительных выработок для воспроизводства фронта очистных забоев технический

уровень горных работ на шахте тем выше, чем ниже указанный показатель. Снижение удельного проведения выработок обеспечивает, помимо прямого экономического эффекта, упрощение планировочных решений в пределах шахтных и выемочных полей, благодаря чему сокращается объем проведения подземных транспортных и энергетических коммуникаций, а также улучшаются условия проветривания выработок, что особенно важно для газообильных шахт, чтобы снизить вероятность распространения взрыва метановоздушных смесей и угольной пыли.

8. Проведены исследования влияния прямоточных схем проветривания на эндогенную пожароопасность выемочных участков. Применение такой схемы связано с необходимостью поддержания вентиляционной выработки в выработанном пространстве. Это приводит к усилению фильтрации воздуха в зонах выработанного пространства, примыкающего к очистному забою и вентиляционной выработке. Указанный факт усугубляет эндогенную пожароопасность выемочных участков. Установлено, что распределение удельного аэродинамического сопротивления в выработанном пространстве как по глубине его, так и в направлении от транспортного к вентиляционному штреку оказывает влияние на положение, форму и размеры пожароопасных зон. Причем наиболее существенным будет влияние распределения удельного аэродинамического сопротивления вдоль длины лавы для пород средней устойчивости и труднообрушаемых.

9. Предложена конструкция автоматической системы локализации взрывов типа АСВП-ЛВ.1М(ПГИ) и технологические схемы их расстановки на основе расчета скорости распространения фронта пламени с учетом параметров пылевзрывоопасности горных выработок, а также проведены ее испытания на стендах ВостНИИ и КФ ВНИМИ, которые показали ее эффективность подавлять сильные взрывы в начальной стадии их развития, скорость распространения фронта пламени которых составляет 340-660 м/с.

Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в следующих изданиях, **включенных в Перечень ВАК**:

1. Гречишкин П.В., Харченко В.Ф., Розонов Е.Ю., Горностаев В.С., Панин С.Ф. Повышение эффективности оценки состояния пород кровли выработок с применением различных методов в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» // Уголь. – 2019. – № 10. – с. 42-46.

2. Джигрин А.В., Разумняк Н.Л., Харченко В.Ф., Горностаев В.С. Автоматическая система взрывоподавления локализации взрывов многофункциональная // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – №1. – с. 37-41.

3. Джигрин А.В., Харченко В.Ф., Малова С.А., Розонов Е.Ю., Карасев Г.А., Горностаев В.С., Щербаков В.Н. Основные проблемы повышения безопасности и эффективности разработки угольных пластов подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10 (специальный выпуск 30). – С. 3-16. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-30-3-16.

4. Горностаев В.С. Прогнозирование возникновения и распространения взрывов в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10 (специальный выпуск 30). – С. 24-31. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-30-24-31.

5. Горностаев В.С. Метод оценки влияния безопасности работ на эффективность горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10 (специальный выпуск 30). – С. 32-40. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-30-32-40.