

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий  
Донецкой Народной Республики

Государственный научно-исследовательский институт  
горноспасательного дела, пожарной безопасности  
и гражданской защиты «Респиратор»



**Агеев Владимир Григорьевич**

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ  
ЛОКАЛИЗАЦИИ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ ВЕДЕНИИ  
ГОРНОСПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ ПО ИЗОЛЯЦИИ  
ПОЖАРОВ В ШАХТАХ**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Донецк – 2016

Работа выполнена в Государственном научно-исследовательском институте горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

Научный консультант: доктор технических наук, старший научный сотрудник  
**Брюханов Александр Михайлович**

Официальные оппоненты: **Палеев Дмитрий Юрьевич**, доктор технических наук, начальник научно-исследовательского отдела ФГКУ Национальный аэромобильный спасательный учебно-тренировочный центр подготовки горноспасателей и шахтеров, «Национальный Горноспасательный Центр» МЧС России, г. Кемерово

**Шевцов Николай Романович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство зданий, подземных сооружений и геомеханика» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

**Малеев Николай Владимирович**, доктор технических наук, начальник Государственного предприятия «Донецкий экспертно-технический центр», г. Донецк

Ведущая организация: **Государственное учреждение «Институт физики горных процессов»**, г. Донецк

Защита диссертации состоится «20» октября 2016 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.008.01 при ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, к. 203. Тел. +38(062)304-30-55. E-mail: [vchenarada@dgtu.donetsk.ua](mailto:vchenarada@dgtu.donetsk.ua)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, адрес сайта университета: <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «12» сентября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.008.01  
доктор технических наук, профессор

И.А. Бершадский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** На шахтах Украины с переходом работ на глубокие горизонты, увеличением протяженности горных выработок и газообильности становится проблематичным активное тушение пожаров и ликвидация последствий взрывов метановоздушных смесей и угольной пыли. Опасность этого вида аварий велика еще и потому, что пожары в угольных шахтах, опасных по газу, могут сопровождаться взрывами, а взрывы вызывать новые пожары.

Согласно статистическим данным около 90 % взрывов и вспышек метана в угольных шахтах происходят из-за повышенной концентрации метана в выработках в результате их загазованности.

Учеными и специалистами разных стран накоплен и систематизирован значительный экспериментальный материал по загазованности горных выработок при различных газодинамических процессах. Тем не менее эмпирический характер полученных зависимостей не позволяет использовать их вне выполненного диапазона экспериментальных исследований по дебиту метана, расходу и скорости воздуха, параметрам выработок.

Во время взрывов газопылевоздушных смесей в угольных шахтах возникают воздушные ударные волны, которые обладают большим запасом энергии и способны распространяться на большие расстояния по горным выработкам. Выполненные в 80-х годах прошлого столетия экспериментальные исследования параметров воздушных ударных волн, возникающих во время взрывов газа и угольной пыли в горных выработках, позволили разработать методику определения параметров воздушных ударных волн при взрывах газов и пыли в горных выработках (безопасных расстояний).

Указанная методика имеет ряд существенных недостатков, в том числе не содержит расчетных данных о загазованности горных выработок до взрывоопасных концентраций. Расчёты давления по мере затухания воздушных ударных волн при движении по горным выработкам основаны на статическом методе определения избыточного давления и не учитывают динамики во времени воздушных ударных волн, их отражения при столкновении с перемычками и забоями тупиковых выработок, а потери давления на сопряжениях выработок принимаются без учёта скорости движения смеси газов и её температуры.

Все сказанное приводит к тому, что безопасное расстояние от места взрыва до места ведения горноспасательных работ определяется неверно. Характерным примером может служить авария на АП «Шахта им. А.Ф. Засядько», где во время возведения взрывоустойчивых перемычек погибли горноспасатели.

Для защиты подземных сооружений, коммуникаций и оборудования от воздействия воздушных ударных волн и изоляции аварийных участков применяют различные конструкции взрывоустойчивых перемычек, однако выбор конструкции и материала для них не обоснован.

Все сказанное выше говорит об актуальности и необходимости комплексного решения важной научно-технической проблемы обеспечения безопасности ведения горноспасательных работ при изоляции пожаров на угольных шахтах, опасных по газу и пыли.

**Степень разработанности темы исследования.** Тематика и уровень разработок соответствуют «Программе повышения безопасности работ на угледобывающих и шахтостроительных предприятиях», утвержденной Кабинетом Министров Украины 29.03.2006 № 374 с изменениями, внесенными постановлением Кабинета Министров Украины 18.05.2011 № 521. Соискатель принимал участие как руководитель или ответственный исполнитель в работе по темам «Разработать новую редакцию „Устава по организации и ведению горноспасательных работ ГВГСС МЧС ДНР”», «Разработка СОУ «Методика определения параметров воздушных ударных волн и безопасных расстояний при взрывах газов и пыли в горных выработках» (№ ГР 0109U0097649), «Разработка отраслевого стандарта (СОУ) «Шахтные взрывоустойчивые изолирующие сооружения. Общие технические требования» (№ ГР 0108U005875), «Разработка отраслевого стандарта (СОУ) «Вентиляционные, изолирующие и взрывоустойчивые перемычки при ликвидации аварий в угольных шахтах. Конструкция, материалы и технология возведения» (№ ГР 0109U006491), «Исследование характера формирования и отражения ударных волн при взрывах метана в горных выработках» (1991110065), «Исследование распространения и взаимодействия ударных волн при повторных взрывах метана в сети горных выработок» (1991210599), «Исследование характера взрывоподавления ударных волн перемычками» (1991210125).

**Цель и задачи исследований.** Цель работы – обеспечение безопасности ведения горноспасательных работ при изоляции пожаров в условиях потенциальной угрозы взрыва метанопылевоздушных смесей.

В соответствии с поставленной целью определены и решены следующие задачи:

- выполнить анализ состояния решения проблемы взрывозащиты при изоляции пожаров;
- исследовать нестационарные процессы внезапного выделения метана в горных выработках и установить закономерности формирования взрывоопасной среды;
- выполнить теоретические исследования процессов формирования и распространения воздушных ударных волн при взрывах метана и угольной пыли в сложной сети горных выработок;
- разработать алгоритм и программу расчета параметров распространения воздушных ударных волн в горных выработках с целью определения безопасных расстояний от эпицентра взрыва;
- исследовать воздействие воздушных ударных волн на различные преграды и средства взрывоподавления;
- разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, определить ее прочность в

зависимости от механических характеристик материала, условий нагружения и поперечного сечения горной выработки;

- разработать способы и технические средства взрывоподавления при изоляции пожаров.

**Объект исследования** – обеспечение безопасности горноспасательных работ при изоляции пожаров в угольных шахтах.

**Предмет исследования** – процессы и закономерности образования воздушных ударных волн в горных выработках, а также пути совершенствования мер и средств их подавления и локализации.

### **Научная новизна полученных результатов**

#### **1. Впервые:**

- раскрыт механизм образования воздушных ударных волн при взрывах метанопылевоздушных смесей в горных выработках, заключающийся в том, что возникновение источника зажигания приводит к быстрому, цепному распространению горения по всему взрывоопасному объему (концентрация метана от 5 до 15 %) с выделением большого количества теплоты, образованием скачков температуры, давления, плотности смеси газов и возникновением воздушных ударных волн. Это позволило обосновать использование в уравнении энергии функции источника выделения теплоты с учетом скорости распространения пламени на участке загазованной зоны для установления характера повышения давления в аварийной выработке;
- установлены зависимости параметров распространения воздушных ударных волн в сквозных, тупиковых и изолированных горных выработках при различном начальном избыточном давлении (до 0,1 МПа – дозвуковое и свыше 0,1 МПа – сверхзвуковое течение газа), от аэродинамического сопротивления и геометрических параметров выработок, а также наличия преград, вызывающих скачки давления. Это позволило разработать алгоритм и программу расчета динамики воздушных ударных волн в сети горных выработок с учетом потерь давления в местах сопряжений различного вида;
- уточнен механизм распространения и взаимодействие воздушных ударных волн с различными типами преград и перемычек при распространении по сети горных выработок. Установлено, что при взаимодействии воздушной ударной волны со «сквозными» конструкциями, типа парашютная перемычка, наблюдается снижение давления во фронте волны на 20 – 25 %, отраженная волна не генерируется, а фронт пламени, проходя через перемычку, распространяется на расстояние до 100 м от эпицентра взрыва и при отсутствии взвешенной пыли – затухает; при взаимодействии воздушной ударной волны с податливыми реологическими средами типа пенных перемычек происходит плавное демпфирование давления во фронте воздушной ударной волны, снижение ее кинетической энергии и полное гашение пламени, в результате чего наблюдается резкое уменьшение ее скорости ниже звуковой; при взаимодействии воздушной ударной волны

с породными завалами, гипсовыми или бетонными перемычками происходит резкий скачок давления во фронте воздушной ударной волны, в результате чего давление отраженной воздушной ударной волны может превышать первоначальное в 3 – 7 раз. Полученные результаты позволили разработать технологию пенной защиты гипсовых и бетонных перемычек в течение времени «схватывания» вяжущего раствора и приобретения перемычкой заданных структурно-механических свойств;

- обоснована возможность и область применения различных искусственных преград (пенные и породные пробки, парашютные перемычки, водные и сланцевые заслоны) для гашения воздушных ударных волн в сети горных выработок, что позволяет сократить безопасные расстояния мест ведения горноспасательных работ при угрозе взрыва метанопылевоздушных смесей. Так, заполнение горной выработки по всему поперечному сечению пенными пробками длиной не менее 180 м, а породными пробками не менее 6 м приводит к резкому сокращению распространения пламени и снижению избыточного давления в воздушной ударной волне до 0,01 МПа;
- теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены рациональные параметры гипсовой взрывоустойчивой перемычки, обеспечивающей безопасность аварийно-спасательных работ при изоляции пожарного участка в условиях потенциальной угрозы взрыва метанопылевоздушных смесей. Установлена зависимость толщины взрывоустойчивой перемычки от площади поперечного сечения выработки, глубины места возведения, прочностных характеристик материалов моноблока перемычки при максимальной нагрузке воздушной ударной волны 2,8 МПа. Так, для взрывоустойчивой перемычки из строительного гипса при площади поперечного сечения горной выработки 16 м<sup>2</sup> и глубине места ее возведения 900 м толщина будет равна 3,2 м, а из высокопрочного пластифицированного гипса при тех же условиях 2,2 м.

## ***2. Получили дальнейшее развитие представления о механизмах:***

- формирования взрывоопасной среды при выбросах угля и газа в лавах и тупиковых выработках, что приводит к нарушению нормального режима проветривания, вследствие чего происходит опрокидывание вентиляционного потока и загазование свежей струи воздуха. Установлено, что при абсолютной газоносности пластов свыше 25 м<sup>3</sup>/т взрывоопасная среда формируется в горных выработках на протяжении 1000 м и может сохраняться в течение часа;
- лавинообразного процесса нарастания давления при цепной реакции быстрого горения, когда максимальное давление во фронте воздушной ударной волны увеличивается в зависимости от температуры, суммарной длины зоны горения и зоны распространения пламени;

- распространения и отражения воздушных ударных волн в сложной сети горных выработок с учетом различных видов сопряжений и углов поворота, эффектов увеличения давления воздушных ударных волн при их наложении друг на друга;
- формирования скачков давления, вызванных взаимодействием воздушных ударных волн с гипсовыми и бетонными перемычками, пенными и породными пробками, водяными и сланцевыми заслонами.

**Практическая ценность полученных результатов** заключается в разработке способов и технических средств обеспечения безопасности при изоляции пожаров в угольных шахтах. Основные результаты работы использованы при создании и внедрении в подразделениях Государственной военизированной горноспасательной службы в угольной промышленности нормативно-правовых документов:

Устав по организации и ведению горноспасательных работ ГВГСС МЧС ДНР: утв. МЧС ДНР 09.12.2015 № 965, зарегистрировано Минюстом ДНР 28.12.2015 № 856. – Донецк, 2016. – 332 с.;

СОУ-Н 10.1.00174102.012:2010 Параметры воздушных ударных волн и безопасных расстояний при взрывах газа и пыли в горных выработках. Методика расчета;

СОУ 10.1-00174102-016:2011 Вентиляционные, изолирующие и взрывоустойчивые перемычки при ликвидации аварий в угольных шахтах. Конструкция, материалы и технология возведения;

СОУ 10.1.00174102-022:2012 Шахтные взрывоустойчивые изолирующие сооружения. Общие технические требования.

Выполненные исследования позволяют:

- рассчитывать безопасные расстояния от места возможного взрыва до места возведения взрывоустойчивых перемычек;
- разработать требования к материалам, а также технологию и технические средства дистанционного сооружения взрывоустойчивых перемычек гидромеханическим способом;
- обосновать параметры и выбрать конструкцию взрывоустойчивых перемычек;
- дать оценку существующих и создания новых средств взрывозащиты в горных выработках, что позволяет их проектировать с заданными технологическими параметрами и защитить выработки от взрыва метанопылевоздушных смесей.

**Методология и методы исследования.** При выполнении работы использован комплексный метод исследования, который включает обработку и обобщение литературных исследований и патентных материалов, проведение теоретических, экспериментальных исследований и апробацию полученных результатов на происшедших авариях в угольных шахтах.

Модели формирования и распространения воздушных ударных волн по горным выработкам разрабатывались на основе классических уравнений течения газов с образованием ударных волн; расчеты взрывоустойчивых

сооружений выполнялись на основе разработанной математической модели напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, представленной в виде трехмерной пластины с однородными и неоднородными граничными условиями, под действием нагрузок от воздушной ударной волны и разрушенных горных пород, на основании результатов которой определена основная техническая характеристика перемычки – толщина в зависимости от механических параметров ее материала, сечения и глубины расположения выработки; экспериментальные исследования заключали в себе моделирование физических процессов при возникновении и распространении воздушных ударных волн в моделях, приближенных к условиям горных выработок и взаимодействию их с различными преградами и средствами взрывозащиты. Оценивали результаты в условиях реальных взрывов на шахтах АП «Шахта им. А.Ф. Засядько» (Украина), «Распадская» (Россия).

**Положения, выносимые на защиту:**

- унифицированная математическая модель формирования, распространения и отражения воздушных ударных волн в сложной сети горных выработок при взрывах метана и пыли и разработанный на этой основе метод расчета безопасных расстояний от места возможного взрыва до места ведения горноспасательных работ;
- алгоритм и программа расчета распространения воздушных ударных волн в сложной сети горных выработок, отличающиеся от известных вычислением избыточных давлений и температур с учетом влияния отражения волн от различных препятствий и наложения при встрече из разных выработок;
- результаты аналитического и численного исследования процесса взаимодействия воздушной ударной волны с изолирующими перемычками, экспериментально проверенные в натуральных условиях, что позволило установить максимально возможные давления на перемычки различных типов и конструкций;
- теоретические зависимости, подтвержденные экспериментальными исследованиями процессов гашения воздушных ударных волн пенными и породными пробками, что позволило обосновать параметры воздушных гашения ударных волн средствами взрывоподавления;
- конструктивные параметры изолирующей взрывоустойчивой перемычки с учетом прочностных характеристик материалов для их сооружения гидромеханическим способом, поперечного сечения выработки и глубины места возведения.

**Степень достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждена соответствием полученных зависимостей основным физическим законам и установившимся представлениям о протекании процессов горения и взрыва; необходимым объемом экспериментальных данных, полученных в условиях, приближенных к шахтным, и в шахтных условиях; удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных данных относительно распространения и



гашения воздушных ударных волн различными средствами; сходимостью теоретических зависимостей толщин взрывоустойчивых перемычек из различных материалов с расчетными, а также согласованностью результатов с известными теоретическими и экспериментальными результатами других исследователей, полученными другими методами.

**Личный вклад соискателя.** Вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, состоит в формировании направлений исследований, постановке задач, выборе путей их решения, постановке и проведении исследований, обработке, анализе и интерпретировании результатов.

Все результаты, полученные при решении поставленных в диссертации задач, выполнены автором самостоятельно. В научных работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат: [4, 6, 8, 12] – анализ и оценка характера распределения газов в исходящих струях лав в аварийных условиях; [4, 9, 10, 18] – обоснование газодинамического подхода и методов численно-аналитических решений уравнений газовой динамики формирования и воздушных распространения ударных волн по горным выработкам; [13] – обоснование параметров барьерных перемычек; [15] – анализ результатов моделирования взаимодействия воздушных ударных волн в горных выработках; [16] – разработка принципов совершенствования оборудования для изоляции пожаров; [8, 19, 23, 24] – разработка математической модели формирования взрывоопасной среды при газодинамических явлениях; [20] – анализ результатов экспериментов по гашению воздушных ударных волн в горных выработках огнетушащими порошками; [25, 28] – разработка математической модели напряженного состояния шахтной взрывоустойчивой перемычки; [26, 31, 32, 33, 34, 35, 38] – численное экспериментирование развития и распространения воздушных ударных волн в горных выработках; [12, 30, 37] – методы расчета и выбор параметров оборудования для возведения взрывоустойчивых перемычек.

**Апробация результатов исследований.** Результаты работы доложены и обсуждены на: заседании секции «Предупреждение и ликвидация подземных аварий» ученого совета НИИГД «Респиратор»; 1-й Международной научно-технической конференции «Подземные катастрофы: модели, прогноз, предупреждение» (Днепропетровск, 2009); XI Международной конференции по математическому моделированию МКММ – 2010 (Херсон, 2010); X Международной научно-практической конференции «Пожарная безопасность – 2011» (Харьков, 2011); 2-й Международной научно-технической конференции «Подземные катастрофы: модели, прогноз, предупреждение» (Днепропетровск, 2011); VI Международной конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве» (Тирасполь, 2011); Международной конференции по математике МДОЗМФ – 2011 (Харьков, 2011); XII Международной конференции по математическому моделированию МКММ – 2011 (Херсон, 2011); Международной конференции «Форум горняков – 2012» (Днепропетровск, 2012); XXIV Международной научно-практической конференции по проблемам пожарной безопасности (Москва, 2012); XIII Международной

конференции по математическому моделированию МКММ – 2012 (Херсон, 2012); XI Международной научно-практической конференции «Пожарная безопасность и аварийно-спасательное дело: состояние, проблемы и перспективы» (Киев, 2013); VIII Международной конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве» (Тирасполь, 2013); XIV Международной конференции по математическому моделированию МКММ – 2013 (Херсон, 2013); Международной конференции по методам дискретных особенностей в задачах математической физики (Харьков – Херсон, 2013); Международной конференции «Повышение уровня охраны труда и промышленной безопасности на предприятиях угольной промышленности Украины. Дегазация и утилизация шахтного газа метана» (Ялта, 2013).

**Публикации.** Основные научные и прикладные результаты исследований опубликованы и представлены в одной монографии, двух открытиях, 37 научных статьях в специализированных журналах и сборниках (в том числе в России, Казахстане, Польше), четырех патентах Украины на способы и средства безопасности.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, восьми разделов, заключения, списка использованной литературы из 250 источников на 28 страницах. Работа изложена на 438 страницах машинописного текста, из них основного текста 389 страниц, 124 рисунка, 17 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, представлены цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** представлен обзор работ и дан анализ современного состояния исследований вопросов взрывозащиты при изоляции пожаров в угольных шахтах. Фундаментальные исследования в области физики и механики взрыва Л.Д. Ландау, Я.Б. Зельдовича, С.А. Христиановича, М.А. Садовского и других послужили основой создания теории формирования, распространения и локализации взрывов метанопылевоздушных смесей в угольных шахтах. Существенный вклад в развитие этой теории, установление условий образования взрывоопасной среды, а также создание способов и технических средств ведения горноспасательных работ внесли А.А. Скочинский, В.Я. Балтайтис, В.Л. Божко, А.А. Мясников, А.А. Гурин, К.К. Бусыгин, А.И. Бобров, А.М. Чеховских, Н.Д. Зрелый, В.Ф. Доценко и др.

Дальнейшее развитие вопросы взрывоподавления при тушении пожаров в угольных шахтах получили в работах А.М. Брюханова, А.М. Морева, С.П. Грекова, Ю.Ф. Булгакова, В.М. Плотникова, Д.Ю. Палева, Ю.В. Кудинова, И.Н. Зинченко, О.П. Брабандера и др.

Выполненный обзор существующих исследований по формированию в горных выработках воздушных ударных волн и средств защиты от них

показал, что действующие в настоящее время нормативные акты, Правила безопасности в угольных шахтах и Устав по организации и ведению горноспасательных работ ГВГСС МЧС ДНР предусматривают комплекс мер и средств, являющихся основой для создания безопасных условий работ в шахтах, однако взрывы все еще происходят, что свидетельствует о том, что принятых мер и средств еще недостаточно и они нуждаются в совершенствовании.

В литературе отсутствуют математические модели формирования, распространения и отражения воздушных ударных волн в сложной сети горных выработок при взрывах метана и угольной пыли.

Для защиты подземных сооружений, коммуникаций и оборудования от воздействия воздушных ударных волн используются различные конструкции взрывоустойчивых перемычек. Параметры перемычек недостаточно научно обоснованы. Существующие методы расчета перемычек для гашения воздушных ударных волн сложны и не учитывают разнообразия конструкций. Поэтому разработка методов расчета взрывоустойчивых перемычек, в том числе многоразового использования, основанных на стандартах предприятия и содержащих требования недопущения утечек через них воздуха является актуальной задачей.

На основании сказанного сформулированы цель и задачи исследований.

**Во втором разделе** изложены результаты исследований закономерностей формирования взрывоопасной среды в горных выработках при газодинамических явлениях. Особая роль уделена выбросам угля и газа, а также прорывам метана как наиболее опасным явлениям, приводящим к загазованию выработки.

Показано, что постепенное, а не мгновенное газовыделение при выбросах необходимо связывать с переходом метана из связанного в свободное состояние, а следовательно, с его молекулярной диффузией в порах сорбента и с десорбцией метана с поверхности частиц угля и породы.

Обработка экспериментальных данных МакНИИ, собранных на 40 угольных шахтах Украины, где за период 1990...2006 гг. произошло 38 выбросов угля и газа в тупиковых выработках и 27 в лавах, показала, что существует достаточно тесная квадратичная зависимость количества выделяющегося метана от массы выброшенного угля в тупиковой выработке

$$V = 28,3G - 0,005G^2 \quad (1)$$

и в лаве

$$V = 25,6G - 0,004G^2, \quad (2)$$

где  $G$  – масса выброшенного угля, т;  $V$  – объем выделившегося метана, м<sup>3</sup>.

Интенсивность источника газовыделения связана с процессами десорбции и с переходом метана из связанного в свободное состояние. Чем меньше частицы угля, тем быстрее должен быть вынос метана. Об этом говорят данные аналитических и экспериментальных исследований,

полученные в НИИГД «Респиратор» С.П. Грековым, что дало возможность представить функцию интенсивности ( $1/c$ ) источника газовой выделения в виде

$$i(t) = \frac{\mu V}{S(x_2 - x_1)} \exp(-\mu t), \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент скорости десорбции метана из угля,  $1/c$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения выработки,  $m^2$ ;  $t$  – время с момента выброса угля,  $c$ ;  $x_1$  – расстояние выброшенной массы угля от левого конца выработки,  $m$ ;  $x_2$  – расстояние выброшенной массы угля от левого конца выработки плюс длина зоны выброса,  $m$ .

Установлено, что коэффициент скорости десорбции метана обратно пропорционален приведенному радиусу частиц угля и, таким образом, чем меньше радиус, тем интенсивнее газовыделение.

Функция интенсивности источника газовой выделения (3) введена в уравнение турбулентного переноса метана по выработкам:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + i(x, t), \quad (4)$$

где  $C$  – концентрация метана в выработке;  $u$  – скорость воздуха,  $m/c$ ;  $D_x$  – коэффициент турбулентной диффузии метана,  $m^2/c$ ;  $x$  – координата вдоль оси выработки,  $m$ .

Для уравнения (4) в качестве начального и граничных условий принята начальная фоновая концентрация метана  $C_0$  для выработки штреко-квершлагообразного типа. В случае тупиковой выработки на левой границе принимается равным нулю градиент концентрации метана.

Уравнение (4) решалось в конечных разностях против потока газов с использованием указанных начального и граничных условий. При этом коэффициент диффузии принимался линейно зависимым от скорости воздуха.

На рис. 1 приведены результаты моделирования формирования взрывоопасной среды в лаве и за её пределами после выброса, где отрезок 100...300 м означает длину лавы.

Как показывают результаты моделирования, взрыв в лаве может произойти сразу же после выброса, если имеется источник воспламенения, или взрыв возникнет уже в уклоне и мгновенное горение распространится обратно в лаву. В этом случае взрыв будет большой мощности, поскольку, как видно на рис. 1, длина зоны с концентрацией метана 10...12 % – почти 900 м.

На рис. 2 приведены результаты моделирования формирования взрывоопасной среды в лаве и за её пределами после прорыва метана из почвы выработанного пространства.

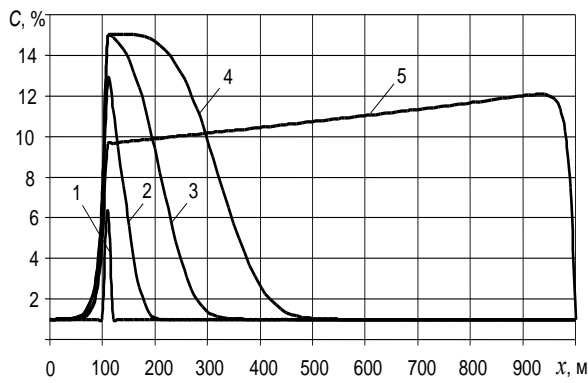


Рисунок 1. Формирование взрывоопасной среды на выемочном участке через различное время после внезапного выброса угля и газа:

1 –  $t = 7$  с; 2 –  $t = 1,2$  мин; 3 –  $t = 3,7$  мин;  
4 –  $t = 7,3$  мин; 5 –  $t = 61$  мин

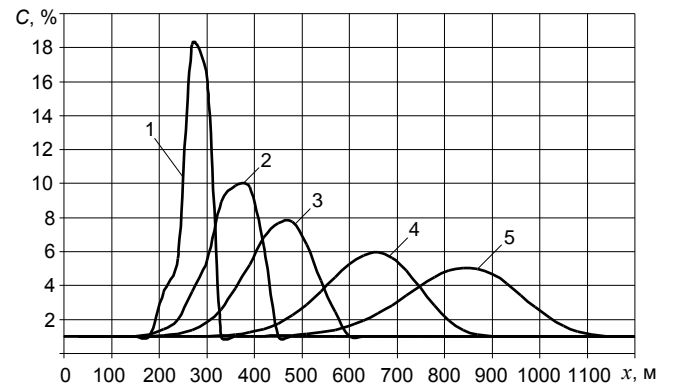


Рисунок 2. Формирование взрывоопасной среды на выемочном участке через различное время после прорыва метана:

1 –  $t = 10$  с; 2 –  $t = 48$  с; 3 –  $t = 1,6$  мин;  
4 –  $t = 3,2$  мин; 5 –  $t = 4,8$  мин

В случае прорывов метана действие источника газовыделения принято кратковременным. Как видно (см. рис. 2) по данным результатов моделирования, уже через 10 с в лаве образуется недопустимая концентрация метана на протяжении 100 м, которая может вызвать мощный взрыв. Это же может произойти и в вентиляционной выработке спустя одну минуту. Далее газовое облако будет рассеиваться и через 5 мин после прорыва метана его концентрация в уклоне станет меньше нижнего предела взрываемости.

При моделировании рассмотрены также случаи формирования взрывоопасной среды в тупиковой выработке при внезапном выбросе породы, угля и газа. Установлено, что здесь при прекращении проветривания в тупиковой выработке длиной 500 м, несмотря на небольшой выброс угля (всего 10 т), общий объем метана 282 м<sup>3</sup>. Это приводит к существованию взрывоопасной концентрации метана даже через 12 ч на протяжении 225 м, что может привести к мощному взрыву.

Используя полученные данные и задавая время с момента возникновения газодинамического явления, его вид и мощность, можно определить длину зоны со взрывоопасной концентрацией метана и ожидаемое избыточное давление при взрыве.

**Третий раздел** посвящён теоретическим исследованиям процессов формирования оформления и распространения воздушных ударных волн в тупиковых и сквозных выработках при заранее заданном избыточном давлении в сети горных выработок.

Сокращённая запись уравнений течения газов при взрыве представлена в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + c \frac{\partial \bar{F}}{\partial x} + \bar{G} = 0. \quad (5)$$

Здесь функции  $\bar{U}, \bar{F}, \bar{G}$  представляют собой упорядоченные наборы основных переменных и выглядят таким образом:

$$\bar{U} = \left\{ \begin{array}{c} \bar{\rho} \\ \bar{u} \\ \bar{P} \end{array} \right\}; \quad \bar{F} = \left\{ \begin{array}{c} \bar{u} \\ \bar{P} + \bar{u}^2 / \bar{\rho} \\ [\gamma \bar{P} + (\gamma - 1) \bar{u}^2 / 2\gamma \bar{\rho}] \bar{u} / \bar{\rho} \end{array} \right\}; \quad \bar{G} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \bar{r} \bar{u} |\bar{u}| / \bar{\rho} \\ \bar{\alpha} (\bar{P} / \bar{\rho} - 1) - \bar{q} \end{array} \right\}, \quad (6)$$

где  $\bar{\rho} = \rho / \rho_0$  – относительная плотность газовой смеси;  $\bar{u} = \rho u / \rho_0 c$  – относительная массовая скорость смеси газов вдоль выработки;  $\bar{P} = P / P_0$  – относительное давление;  $\bar{r} = \lambda c / 2 \sqrt{S}$  – относительное аэродинамическое сопротивление, 1/с;  $\bar{\alpha} = 4\alpha / (\rho_0 c_p \sqrt{S})$  – относительный коэффициент теплообмена со стенками выработки, 1/с;  $\bar{q} = (\gamma - 1)q / P_0$  – относительная мощность источника тепловыделения при взрыве, 1/с;  $c = \sqrt{P_0 / \rho_0}$  – скорость, близкая к скорости звука и равная 290 м/с;  $P_0$  – давление до взрыва, Па;  $\rho_0$  – плотность воздуха до взрыва, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент аэродинамического сопротивления выработки;  $S$  – площадь поперечного сечения выработки, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена со стенками выработки, Вт/(К·м<sup>2</sup>);  $q$  – мощность источника тепловыделения при взрыве, Вт/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $x$  – координата, направленная вдоль оси выработки, м.

Для численного решения задачи распространения воздушных ударных волн уравнение (5) представлено в конечных центральных разностях:

$$\bar{U}_m^{n+1} = \bar{U}_m^n + \text{Cu}(\bar{F}_{m-1}^n - \bar{F}_{m+1}^n) / 2 - \bar{G}_m^n \Delta t + k \text{Cu} \bar{U}_{m-1}^n - 2\bar{U}_m^n + \bar{U}_{m+1}^n, \quad (7)$$

где  $\text{Cu} = c \Delta t / \Delta x$  – схемное число Куранта;  $k$  – коэффициент схемной диффузии, вязкости и диссипации энергии при численном моделировании газодинамических процессов;  $\Delta x$  – шаг по длине выработки, м;  $\Delta t$  – шаг по времени, с;  $m$  – номер шага по пространственной координате;  $n$  – номер шага по времени.

Для проверки точности численного метода расчёта получены аналитические решения задачи распространения воздушных ударных волн небольшой мощности в тупиковой и сквозной выработках, когда кинетическая энергия меньше потенциальной и можно принять изотермический закон течения газов, пользуясь только уравнением (5) и первыми двумя уравнениями системы (6). При этом выполняется равенство  $P/\rho = P_0/\rho_0$ . В этом случае принималось начальное давление в виде некоторого скачка до  $\bar{P} = \bar{P}_1 > 1$  на участке выработки от  $x_1$  до  $x_2$  при отсутствии теплообмена со стенками выработки и  $q = 0$ . Аналитические решения получены методом Фурье в виде бесконечных рядов  $q = 0$  и  $|u| \approx \text{const}$ .

Как показали дальнейшие исследования, данные численного метода расчёта по формуле (7) при  $k = 0$  совершенно не соответствуют данным аналитического метода решения задачи, поскольку возникают осцилляции, искажающие истинную картину процесса. Только с помощью введения коэффициента стабилизации волны давления раздвинулись и почти совпадают

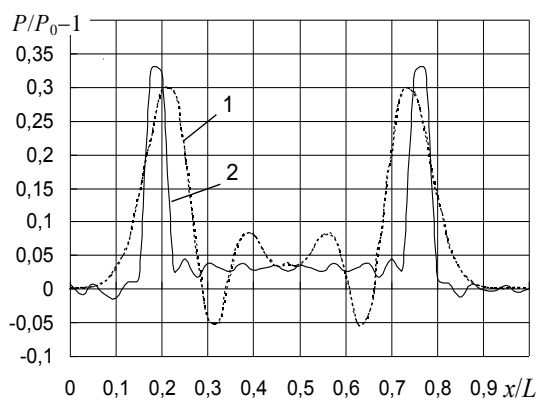


Рисунок 3. Результаты сравнения численного (1) и аналитического (2) решения задачи распространения волны давления в сквозной выработке спустя 1 с с момента взрыва в средней части

с точным решением, как видно на рис. 3, по расположению и по максимуму с погрешностью не более 14 %.

На основании выполненного анализа режимов течения газов при взрывах малой мощности установлено, что дозвуковые движения газов протекают, по сути, в изотермических условиях с повышением температуры всего на 20...40 К.

**В четвертом разделе** рассматриваются физические основы и моделирование процессов формирования и распространения воздушных ударных волн при цепной реакции горения ( $q \neq 0$ ) и теплообмене со стенками выработки, а

также описан способ определения параметров воздушных ударных волн на сопряжениях горных выработок. Обычно при рассмотрении вопроса формирования воздушных ударных волн в качестве начальных условий принимается, как уже было показано, какое-то избыточное давление на некотором участке выработки. Строго говоря, это не соответствует физике процесса. В реальных условиях источник воспламенения в каком-либо месте поджигает горючую смесь газов, в результате чего возникает цепная реакция быстрого горения с химическими реакциями и выделением большого количества теплоты. Поэтому предлагается задавать не давление, а количество тепловой энергии в каком-либо месте выработки с быстрым распространением пламени вдоль загазованной зоны.

Принимается, что функция мгновенного источника тепловыделения, перемещающегося с заданного места вдоль выработки на каждой итерации по времени, представлена в виде

$$\bar{q}_m^n = 3,5n\Delta x / \sqrt{S}. \quad (8)$$

Принято также, что количество шагов по времени  $n < N \approx 70\sqrt{S}/\Delta x$  меньше некоторого целого числа, соответствующего длине зоны загазованности выработки при достижении в её конце максимального значения избыточного давления 2,8 МПа.

Это даёт возможность производить численные расчёты распределения параметров плотности, скорости, температуры и давления вдоль тупиковых и

сквозных выработок при взрывах большой или малой мощности и цепной реакции горения, используя систему уравнений (5) – (7).

На рис. 4 представлены результаты численных расчётов распределения давления вдоль тупиковой выработки через различное время с момента взрыва при цепной реакции горения в призабойной части на протяжении 50 м.

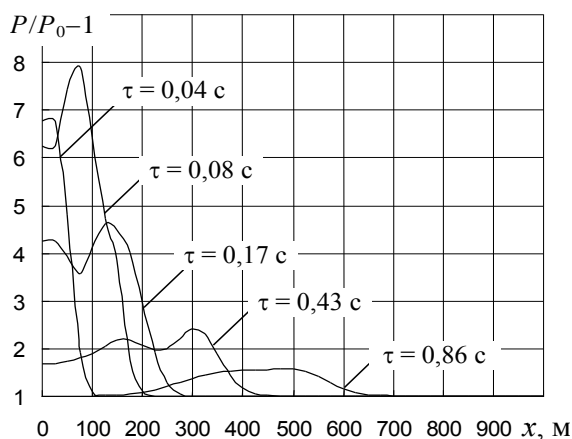


Рисунок 4. Распределение относительного давления вдоль тупиковой выработки через различное время с момента начала цепной реакции горения:

- 1 – 0,04 с; 2 – 0,08 с; 3 – 0,17 с; 4 – 0,43 с;  
5 – 0,86 с

Согласно данным рис. 4, при задании цепной реакции горения давление и максимальная воздушная ударная волна формируются уже за зоной горения где-то на расстоянии 75 м от забоя при длине зоны горения 50 м. Таким образом, давление – это вторичный фактор и не может задаваться заранее.

Результаты сравнения данных численного моделирования динамики воздушных ударных волн при цепной реакции горения с известными данными показывают, что границы максимальных избыточных давлений примерно совпадают, однако в нашем случае отмечаются несколько более

высокие их значения, что повышает коэффициент надёжности при выборе безопасных расстояний при ведении горноспасательных работ.

Кроме того, при численном моделировании установлено, что нельзя принимать начальное распределение давления в виде скачка на участке длиной более 50 м. Это приводит к длительному угасанию воздушных ударных волн и не соответствует действительности. В этом случае следует рассматривать процессы с цепной реакцией горения метана и пыли.

Выполнено также математическое моделирование взаимодействия воздушных ударных волн при повторных взрывах метана, когда первый взрыв происходил в выработке, а последующий в лаве. При этом задавался скачок давления не на некотором участке выработки, а в виде цепной реакции быстрого горения, переходящего во взрыв, как уже было рассмотрено и подтверждено экспериментально.

На рис. 5 представлены результаты моделирования взаимодействия воздушных ударных волн при мощных взрывах сначала в тупиковой выработке, а затем в лаве.

Как установлено, между эпицентрами взрывов через некоторое время возникает разрежение, а в забое тупика происходит удвоение скачка давления.

Таким образом, предложенный метод численных расчётов распространения и отражения воздушных ударных волн любой мощности



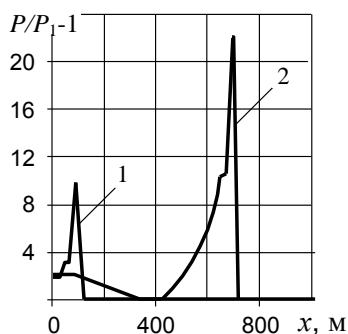


Рисунок 5. Взаимодействие воздушных ударных волн при взрывах метана сначала в тупиковой выработке (1), а затем в лаве (2)

отличается от известных методов: 1) учётом цепной реакции горения, 2) введением во все уравнения схемного коэффициента диффузии массы, вязкости и диссипации энергии для погашения осцилляций; 3) использованием для численных расчётов комбинированной схемы для решения уравнения количества движения, повышающей точность.

Для моделирования поведения воздушных ударных волн на сопряжениях горных выработок были использованы те же уравнения (5) и (6), но с учетом смешения потоков в узлах для 1-го и 3-го уравнений системы.

Наиболее распространённым способом задания граничных условий при решении сеточным методом уравнений дозвуковых и сверхзвуковых течений газа является способ отражения. В этом случае вводится ряд дополнительных узлов, располагаемых на стенках выработки. Тогда, взяв любую ветвь вентиляционной сети в любом направлении (горизонтальном или поперечном), можно применить уже разработанный численный метод. В этом случае все узлы будут внутренними, а в узлах на границах можно принять градиенты плотности и давления, равными нулю, а также скорость, равной нулю:

$$\bar{\rho}_{m-1}^{n+1} = \bar{\rho}_m^{n+1}; \quad \bar{u}_{m-1}^{n+1} = 0; \quad \bar{P}_{m-1}^{n+1} = \bar{P}_m^{n+1}. \quad (9)$$

Полученные результаты в виде затухания воздушных ударных волн представляются в виде таблицы.

Таким образом, выполненные исследования позволили раскрыть механизм образования воздушных ударных волн при взрывах метанопылевоздушных смесей в горных выработках, заключающийся в том, что возникновение источника зажигания приводит к быстрому, цепному распространению горения по всему взрывоопасному объёму (концентрация метана от 5 до 15 %) с выделением большого количества теплоты, образованием скачков температуры, давления, плотности смеси газов и возникновением воздушных ударных волн. Это позволило обосновать использование в уравнении энергии функции источника выделения количества теплоты с учетом скорости распространения пламени на участке загазованной зоны для установления характера повышения давления в аварийной выработке.

**В пятом разделе** выполнена расчетная оценка параметров распространения воздушных ударных волн в сети горных выработок и безопасных расстояний от эпицентра взрыва.

Для этого вводятся следующие исходные данные: давление  $P_0$  и плотность  $\rho_0$  воздуха в выработках при нормальных условиях; количество выработок  $K_1$ , для которых будет производиться расчет; количество узлов (тупиков и сопряжений выработок)  $K_2$ ; период времени  $T$  распространения

воздушных ударных волн в сети выработок, число Куранта  $Cu$ . Для каждой выработки также задаются ее параметры: длина  $L_i$ , площадь поперечного сечения  $S_i$ , коэффициент аэродинамического сопротивления  $\lambda_i$ . Чтобы установить, как связаны между собой выработки, для каждой из них задаются номера начального и конечного узлов. В построенной математической модели распространения воздушных ударных волн в сети горных выработок предполагается, что выработки могут быть сопряжены под определенным углом. Поэтому для каждой выработки должны быть заданы углы, под которыми они сопрягаются с другими выработками. Для сопряжений горных выработок задаются коэффициенты местного аэродинамического сопротивления. Каждая выработка разбивается на  $M_i$  участков, в которых определяются такие параметры, как относительное давление, относительная скорость, относительная плотность и относительная температура.

Далее формируется матрица инцидентности, которая содержит информацию о топологии сети горных выработок.

Чтобы завершить ввод исходных данных, необходимо задать начальные и граничные условия для каждой выработки. Как уже было отмечено, взрыв метана можно моделировать двумя способами: в виде цепной реакции горения, которая учитывается параметром тепловыделения  $q$  и с помощью задания постоянного давления в зоне взрыва  $P_1$ . В первом случае основные параметры в начальный момент времени  $t = 0$  остаются неизменными в любой выработке и в любом узле сопряжения:  $\bar{P}_{i0j} = \bar{p}_{i0j} = \bar{T}_{i0j} = \bar{P}_{j0} = \bar{p}_{j0} = \bar{T}_{j0} = 1$ ;  $\bar{U}_{i0j} = \bar{U}_{jk} = 0$ .

Наборы значений  $\bar{q}_{ikj}$ ,  $\bar{q}_{jk}$  формируются в зависимости от места взрыва метановоздушной смеси, ее объема и местоположения в сети горных выработок.

Во втором случае на загазованном участке выработки в начальный момент времени задается некоторое давление  $\bar{P}_1$ . Остальные параметры в начальный момент времени остаются такими же, как и при нормальных условиях.

После подготовки исходных данных производится расчет параметров воздушных ударных волн в сети горных выработок.

Для примера на рис. 6 приведена схема вентиляционных соединений горных выработок с указанием распределений максимальных значений относительных давлений.

После задания исходных данных выполняем расчет параметров воздушных ударных волн и безопасных расстояний. Проверим, какого значения достигло максимальное относительное давление. Очевидно, что оно находится в зоне взрыва, т.е. в ветви 10 (рис. 7,а). На рис. 7 по данным численных расчетов приведены кривые распределения параметров воздушных ударных волн в зоне взрыва в ветви 2. На графике можем видеть, что максимальное относительное избыточное давление (порядка 2,8 МПа)

зафиксировано на 870 м ветви 10. Обратимся к распределению максимального относительного давления во всей сети горных выработок (см. рис. 6).

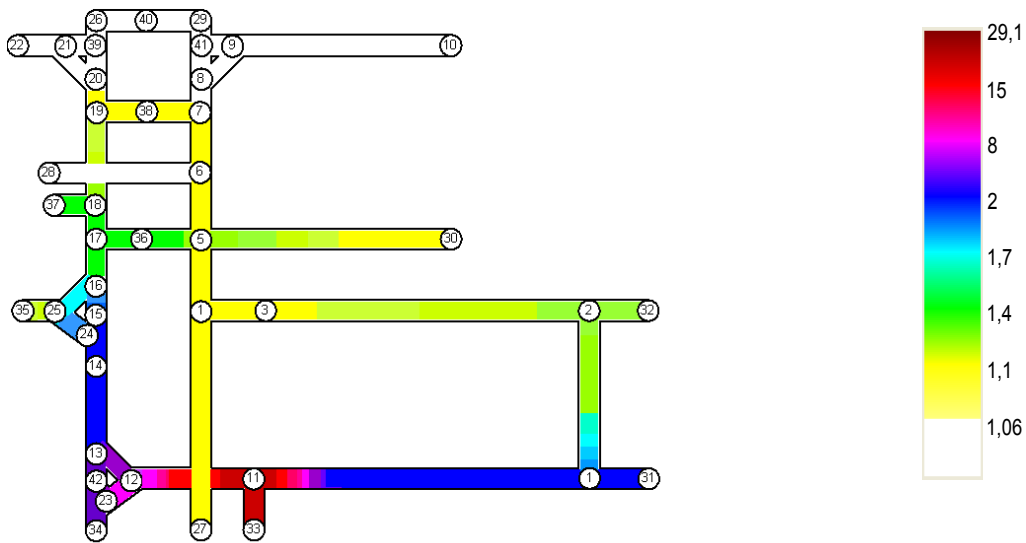


Рисунок 6. Распределение максимальных по времени значений относительного давления во всей сети горных выработок

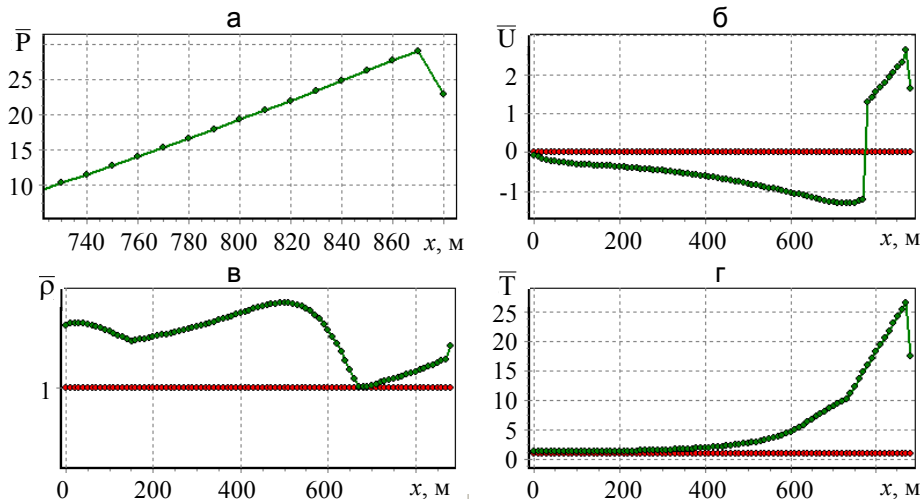


Рисунок 7. Распределение параметров воздушных ударных волн в ветви 2:  
 а – распределение максимумов относительного давления; б – распределение максимумов относительной скорости; в – распределение максимумов относительной плотности; г – распределение максимумов относительной температуры

Как видно из рис. 6, безопасные места, где относительное давление ниже 1,06, обозначены белым цветом. Найдем места в воздухоподающем уклоне, безопасные по давлению. Безопасное место находится в ветви 20 (между узлами 19, 20). Найдем искомое место с точностью до 10 м, воспользовавшись представленными результатами (рис. 8).

Обращая внимание на распределение относительного давления, видим, что оно опускается ниже безопасного значения 1,06 на 167 м в ветви 20, т.е. непосредственно в узле 20 (см. 3-ю строку таблицы). Поскольку далее за

ветвью 20 не было обнаружено относительного давления более 1,06, то всюду после узла 20 возможна установка изолирующих перемычек.

Относительное давление										
x	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Максимумы по t	1,04416	1,03321	1,02777	1,02523	1,02417	1,02498	1,02568	1,02635	1,02702	1,02773

Относительная скорость										
x	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
U	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Максимумы по t	0,00537	0,01032	0,01383	0,01573	0,01666	0,01702	0,01704	0,01685	0,0165	0,01604

Относительная плотность										
x	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Rho	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Максимумы по t	1,08494	1,08082	1,07621	1,07138	1,06659	1,06198	1,05764	1,05362	1,04992	1,04655

Относительная температура										
x	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
T	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Максимумы по t	1,00611	1,00393	1,00318	1,00293	1,0029	1,00298	1,00311	1,00326	1,00342	1,00359

Рисунок 8. Результаты расчета в ветви 20

**Шестой раздел** посвящён исследованию процессов взаимодействия воздушных ударных волн с различными преградами и средствами взрывозащиты.

Для проверки точности численного метода расчёта получено, как и в третьем разделе, аналитическое решение задачи распространения и взаимодействия воздушных ударных волн небольшой мощности в изолированном перемычками участке. В этом случае принималось начальное давление в лаве в виде некоторого скачка до  $\bar{P} = \bar{P}_1 > 1$  на длине  $x_1 \dots x_2$ , а у перемычек принято условие их непроницаемости, когда градиент давления равен нулю. Аналитическое решение получено также методом Фурье в виде бесконечных рядов при  $q = 0$  и  $|u| \approx \text{const}$ .

При моделировании численными методами динамики воздушных ударных волн большой мощности использовались те же уравнения (5), (6) с краевыми условиями для тупиковой выработки, но с добавлением условий непроницаемости на правой перемычке.

Первые экспериментальные исследования гашения воздушных ударных волн гипсовыми перемычками были проведены в натуральных условиях в штольне Карагайлинского полигона КО ВНИИГД. Штольня длиной 190 м и площадью поперечного сечения 4 м<sup>2</sup> пройдена буровзрывным способом без крепления в породах.

Метановоздушная смесь с концентрацией 9,5 % создавалась в штольне путём выпуска метана из баллонов по резиновому рукаву в изолированную диафрагмой зону длиной примерно 160 м.

Гипсовую перемычку с опалубкой и проёмной трубой возводили дистанционно по рукавной линии с помощью комплекса «Темп» с использованием пластифицированного гипса.

Контрольный взрыв был произведен без гипсовой перемычки, но со шпренгельными перемычками, установленными во втором и третьем врубах. В результате взрыва метановоздушной смеси на участке длиной 165 м были расколоты два бруса шпренгельных перемычек. При этом максимальное избыточное давление у перемычек было 1,45 МПа.

Последующие пять взрывов проводили в штольне, изолированной гипсовой перемычкой. Толщина перемычки в каждом новом эксперименте варьировалась в пределах 0,55...1,5 м. В результате пяти взрывов, как показали наблюдения, избыточное давление на гипсовой перемычке было 0,96...1,36 МПа.

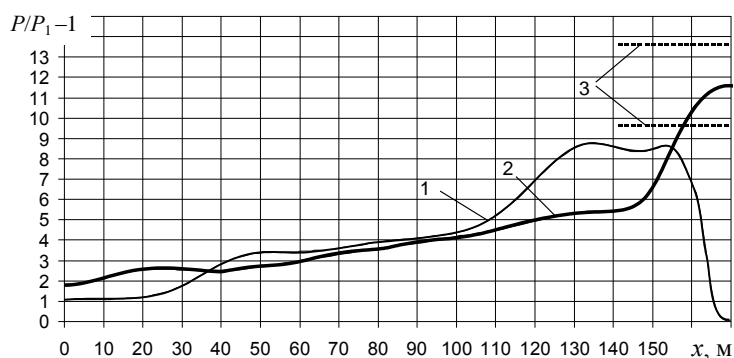


Рисунок 9. Распределение избыточного давления в штольне при её изоляции гипсовой перемычкой:

- 1 – результаты расчёта на подходе воздушной ударной волны к перемычке;
- 2 – на перемычке; 3 – нижнее и верхнее значения в натуральных экспериментах у перемычек

На рис. 9 приведены результаты численного и натурального эксперимента при изоляции тупиковой выработки гипсовыми перемычками.

Как установлено в четырёх экспериментах, перемычки из высокопрочного гипса не разрушаются при толщине 1...1,5 м и избыточном давлении 0,96...1,36 МПа. Они не разрушаются даже при толщине 0,55 м и давлении 1,0 МПа. В то же время перемычка из строительного гипса толщиной

0,75 м в результате взрыва была смещена на 0,1 см со срезом по периметру при избыточном давлении 1,3 МПа.

Экспериментальные исследования гашения воздушных ударных волн пенными и породными пробками проведены в НИИГД в натуральных условиях в штольне «Гранит». Метан в тупиковую часть штольни, отделённую от остальной части выработки диафрагмой из полиэтиленовой плёнки, подавался из цистерн по трубопроводу через редуктор. Длина зоны, заполняемой метановоздушной смесью, была различной. С помощью вентилятора местного проветривания метан равномерно перемешивался с воздухом со средней концентрацией 10 %. Воздушно-механическая пена по вентиляционному трубопроводу подавалась на различные расстояния от устья штольни. Кратность пены  $K = 150 \div 200$ . Расстояние пенной пробки от камеры с высокой концентрацией метана – до 50 м. Источником воспламенения служила нихромовая проволока, нагреваемая с помощью высокого напряжения.

Заполнение пеной штольни на 220 м с зазором между пенной пробкой и газовым потоком привело к уменьшению максимального избыточного давления в два раза. При этом максимум давления находился на том же расстоянии, равном 175 м, откуда следует, что неполное заполнение пеной поперечного сечения штольни приводит к проникновению пламени на большие расстояния.

Другая картина имеет место, если пена заполняет всё сечение штольни. Как показывают данные экспериментальных исследований, перекрытие всего сечения штольни приводит к резкому сокращению длины пламени на 100 м. Очевидно, воздушная ударная волна, воздействуя на пенную пробку, сжимает её на 50 м и не даёт проскочить пламени дальше, существенно снижая максимальное давление. Так, на 225-м метре избыточное относительное давление падает до 0,25 доли и 0,1 доли по отношению к начальному давлению. При этом длина пробки равнялась соответственно 180 и 250 м.

Несколько иная картина наблюдается при гашении воздушных ударных волн породными пробками или барьерными перемычками. С этой целью при экспериментальных исследованиях на расстоянии 12 м от забоя штольни возводилась породная полоса различной толщины и с различной кусковатостью породы. После этого производился запуск метана, его равномерное перемешивание и создание стехиометрической смеси в изолированном участке длиной 12 м.

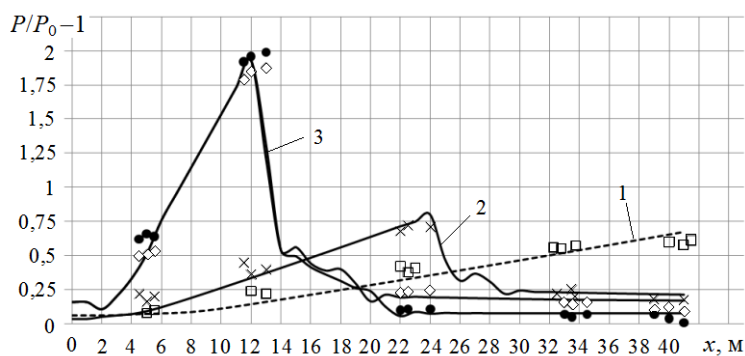


Рисунок 10. Гашение воздушных ударных волн породными пробками:

1 – нулевой эксперимент; 2 – пробка толщиной 3 м с зазором; 3 – пробки толщиной 6 и 8 м

и длине загазованной зоны 12 м происходит плавное нарастание избыточного давления до 0,2 МПа на расстоянии 150 м от забоя штольни. Экспериментальные и расчётные значения максимума давления находятся в полном соответствии друг с другом.

При наличии породной пробки резко меняется динамика воздушной ударной волны и максимум давления приближается к месту расположения породы. Так, при толщине породной пробки 3 м максимум избыточного давления находится на расстоянии 24 м, а его значение равно всего 0,075 МПа (см. рис. 10, кривая 2).

Увеличение толщины породной пробки до 6 м, а затем до 8 м привело к распространению пламени лишь до пробки, то есть на 12 м. Это говорит о том, что вначале зазор между породой и газовой смесью отсутствовал, а затем воздушная ударная волна образовала под кровлей штольни свободное пространство для ее дальнейшего распространения.

Данные экспериментальных исследований и установленная адекватность математической модели натурному объекту позволяют прогнозировать

На рис. 10 показаны результаты экспериментальных и теоретических исследований распространения (кривая 1, нулевой эксперимент) и гашения воздушных ударных волн породными пробками (кривые 2 – 3).

Как установлено в результате экспериментальных исследований (по три эксперимента в каждой серии), при отсутствии породной пробки

численными методами эффективность гашения воздушных ударных волн пенными и породными пробками или барьерными перемычками.

**Седьмой раздел** посвящен обоснованию параметров взрывоустойчивых перемычек. Приведены математическая модель и результаты исследований напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, возводимой горноспасателями из гипса в различных площадях сечений горных выработок.

Рассмотрена наиболее обобщенная расчетная схема перемычки с проемными трубами в виде толстой пластины (плиты) с радиусом кривизны, меняющимся по параболической зависимости или полуокружности, под действием нормальной  $P_{cz}$  (от воздушной ударной волны) и сжимающей –  $P_{cx}$  (от разрушенных горных пород) нагрузок с защемленными тремя краями и свободным четвертым краем в верхней части, а также, в частности, с защемленными краями при  $P_{cx} = 0$  (рис. 11).

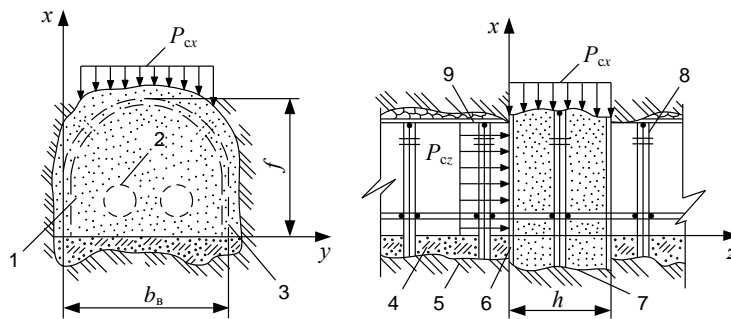


Рисунок 11. Расчетная схема взрывоустойчивой перемычки:

- 1 – наливная гипсовая перемычка; 2 – проемная труба; 3 – контур крепи в свету; 4 – подсыпка почвы выработки; 5 – монолитная порода; 6 – опалубка; 7 – контур вруба в зоне перемычки; 8 – закладка породой; 9 – металлическая арочная крепь; 10 – затяжка

В качестве критериев прочности использованы первая и вторая теории, согласно которым максимальные нормальные и касательные напряжения на растяжение, сжатие и соответственно на сдвиг не должны превышать своих предельных значений, т.е.  $\sigma_{\max(\text{расж})} < \sigma_{\text{п}(\text{р, сж})}$ ,  $\tau_{\max} < \tau_{\text{п}}$ .

Полные компоненты напряжений  $\sigma$  и  $\tau$  (без указания нижних индексов), МПа, в виде суммы напряжений имеют вид

$$\sigma = \sigma^c + \sigma^o; \quad \tau = \tau^c + \tau^o, \quad (10)$$

где индекс «с» относится к монолитной перемычке, «о» – к перемычке с отверстиями (проемными трубами).

С использованием вариационного метода решения краевых задач теории упругости получены следующие уравнения для нормальных и касательных напряжений сплошной перемычки:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\sigma_x^c = E \sum_{i=1}^m b_i p_i'' q_i + \frac{1}{h} U_0 \bar{U}^* - \\
\quad - \frac{Eh}{R\Delta} \bar{z} \sum_{j=1}^n \left[ a_j f_j'' g_j + c_j u_j'' v_j + \frac{1}{4} v (a_j f_j g_j'' + c_j u_j v_j'') \right]; \\
\sigma_y^c = \frac{E}{4} \sum_{i=1}^m b_i p_i q_i'' - \\
\quad - \frac{Eh}{R\Delta} \bar{z} \sum_{j=1}^n \left[ v (a_j f_j'' g_j + c_j u_j'' v_j) + \frac{1}{4} (a_j f_j g_j'' + c_j u_j v_j'') \right]; \\
\tau_{xy}^c = \frac{E}{2} \sum_{i=1}^m b_i p_i' q_i' - \frac{Gh}{R} \bar{z} \sum_{j=1}^n (a_j f_j' g_j' + c_j u_j' v_j'); \\
\tau_{xz}^c = G \sum_{j=1}^n c_j u_j' v_j; \quad \tau_{yz}^c = G \sum_{j=1}^n c_j u_j v_j'; \quad \Delta = 1 - v^2; \quad \left( -\frac{1}{2} \leq \bar{z} \leq \frac{1}{2} \right),
\end{array} \right. \quad (11)$$

где  $a_j, b_j, c_j$  – неизвестные параметры, определяемые из системы линейных алгебраических уравнений;  $f_j, \dots, v_j$  – координатные функции, зависящие от граничных условий и определенные согласно методу Бубнова-Галеркина;  $G$  – модуль сдвига материала (гипса) перемычки;  $U_0, \bar{U}^*$  – размерная и безразмерная функции потенциала нагрузки  $P_{cx}$ ; штрихами обозначены производные.

Напряжения с учетом отверстий имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l}
\sigma_y^0 - \sigma_x^0 + 2i\tau_{xy}^0 = 2 \left[ (\bar{z} - z_1) \varphi''(z_1) - \varphi'(z_1) + \chi'(z_1) \right]; \\
\sigma_x^0 + \sigma_y^0 = 4 \operatorname{Re} \varphi'(z_1),
\end{array} \right. \quad (12)$$

где  $z_1, \bar{z}$  – соответственно комплексная и сопряженная переменные, м.

Искомые комплексные потенциалы  $\varphi(z_1)$  и  $\chi(z_1)$  представим в виде

$$\varphi(z_1) = \sum_{k=1}^m A_k R_k(z_1); \quad \chi(z_1) = \sum_{k=1}^{m+2} B_k R_k(z_1); \quad R_k(z_1) = \frac{1}{(z_1 - l)^k} + \frac{(-1)^{(k+1)}}{(z_1 + l)^k}. \quad (13)$$

Коэффициенты  $A_k, B_k$  определяем из граничного условия на контуре отверстий, для чего используем метод малого параметра и Бубнова-Галеркина.

На основании разработанного алгоритма и составленной программы проведены исследования напряженного состояния перемычки с радиусом проемной трубы 0,6 м, которая прошла испытания в штольне Карагайлы



(Казахстан) для наихудших условий испытаний по нагрузке  $P_{cz} = 1,36$  МПа и толщине  $h = 0,55$  м с минимальными механическими характеристикам для строительного гипса.

Результаты исследований показывают, что при возведении перемычек в выработках с площадью сечения  $4 \dots 7$  м<sup>2</sup> можно использовать одну проемную трубу диаметром 0,8 м, а с большим ее сечением – две, причем запас прочности равен  $1,7 \dots 2,0$ .

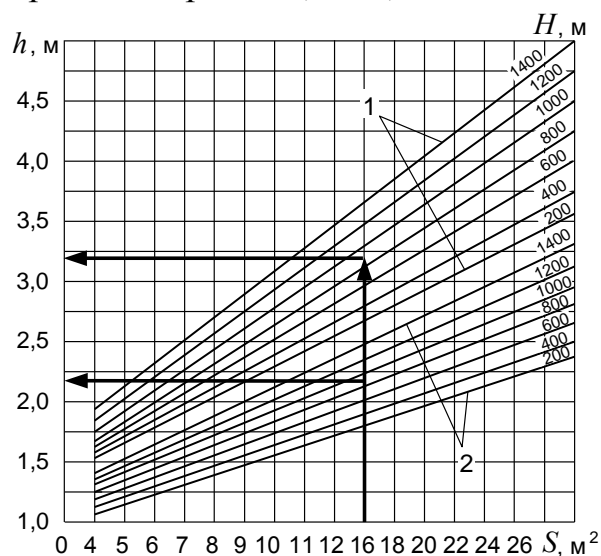


Рисунок 12. Зависимость толщины взрывоустойчивой перемычки  $h$  от площади сечения выработки  $S$ , глубины возведения  $H$ , предельного напряжения на прочность материала  $\sigma_p$ :

- 1 –  $3,0 \leq \sigma_p \leq 9,0$  МПа (строительный гипс);  
 2 –  $\sigma_p > 9,0$  МПа (высокопрочный пластифицированный гипс)

толщину в зависимости от механических характеристик материала, действующих нагрузок, граничных условий, площади сечения и глубины расположения выработки, которая обеспечит безопасную работу горноспасателей и снизит затраты при возведении перемычек в результате ликвидации аварий при взрывах в угольных шахтах.

**Восьмой раздел** посвящен вопросам совершенствования способов и технических средств взрывозащиты. На основании исследований значений давления в воздушной ударной волне и параметров взрывоустойчивых перемычек приведено обоснование свойств материалов для обеспечения сооружения быстровозводимых взрывоустойчивых перемычек. Показано, что в качестве материалов могут быть использованы вяжущие из строительного и высокопрочного гипса. Дана их характеристика, приведены свойства. Разработаны различные добавки с пластифицирующим эффектом для улучшения характеристик растворов из гипсового вяжущего с целью замедления схватывания, повышения водостойкости сооружений и др. В процессе промышленных испытаний сооружений, возведенных из пластифицированного гипсового вяжущего, изучено влияние шахтных условий на свойства гипса при

На основании полученных результатов расчета на прочность перемычки определена ее толщина, значения которой приведены в номограмме (рис. 12).

Отсюда следует, что они уменьшены по сравнению с аналогичными ее значениями, приведенными в нормативных документах, в среднем в 1,3 раза.

При заземленном крае в верхней части перемычки (отсутствие нагрузки  $P_{cx}$  от разрушенных пород кровли) ее толщину можно уменьшить в 1,5 раза.

Таким образом, разработанная математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки позволила научно обосновано определить основную ее техническую характеристику –

длительной эксплуатации возведенных изолирующих сооружений. Определены марки гипсовых вяжущих (Г-5 ... Г-25), применяемых при приготовлении растворов для возведения взрывоустойчивых перемычек. Пластифицированный высокопрочный и строительный гипсы рекомендуются для возведения взрывоустойчивых и изолирующих перемычек. Даны характеристики смесей для взрывоустойчивых перемычек на основе цементных вяжущих.

Выбрана конструкция взрывоустойчивой перемычки. Разработана конструкция быстровозводимой каркасной опалубки в виде готовых комплектов нескольких типоразмеров для различных поперечных сечений горных выработок. Каркасная опалубка применима для возведения взрывоустойчивых перемычек гидромеханическим способом толщиной от 1,6 до 4,5 м в горных выработках с сечением 4...30 м<sup>2</sup>. Разработаны различные способы крепления проёмных труб в конструкциях взрывоустойчивых перемычек и рассчитаны элементы их крепления. Разработаны требования к выбору места установки взрывоустойчивой перемычки и технологии ее сооружения, технические требования к оборудованию для дистанционного возведения монолитных перемычек. Создан комплект оборудования для приготовления и перекачивания растворов ОПР1 производительностью до 10 м<sup>3</sup>/ч, который, по сравнению с существующими аналогами, имеет преимущества, заключающиеся в приготовлении более качественных непластифицированных и пластифицированных быстротвердеющих растворов из гипсового вяжущего с требуемыми физико-механическими характеристиками. Повышение качестваготавливаемых растворов достигнуто за счет применения винтового питателя для дозирования сухого гипсового вяжущего, загружаемого в смеситель, при этом увеличена дальность перекачивания растворов по горизонтали до 150 м за счет применения устройства для ввода жидкой пластифицирующей добавки при их приготовлении. К основным узлам комплекта оборудования для приготовления и перекачивания растворов ОПР1 относятся агрегаты смесительный и насосный (рис. 13). Дана характеристика технических средств для возведения взрывоустойчивых перемычек.

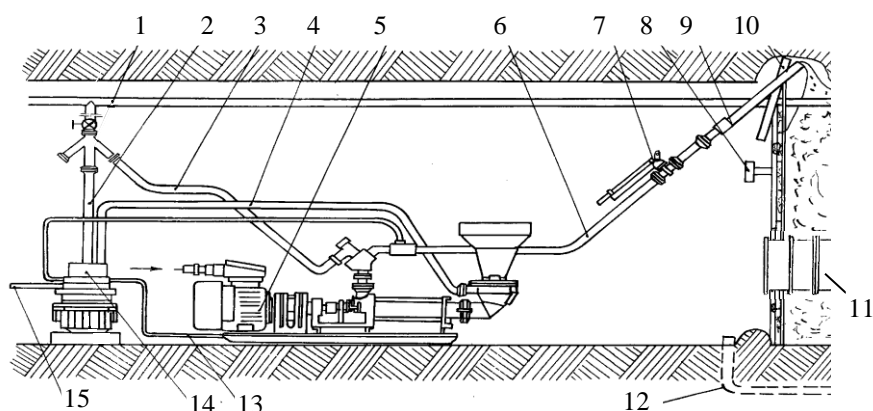


Рисунок 13. Технологическая схема возведения взрывоустойчивой перемычки:  
 1 – пожарно-оросительный трубопровод; 2 – рукав питания; 3 – рукав промывки; 4 – рукав подачи воды в смесительную камеру; 5 – смесительно-нагнетательный агрегат ОПР-1; 6 – растворопровод; 7 – переключатель потока; 8 – труба для измерения депрессии и отбора проб воздуха; 9 – труба выпускная; 10 – труба контрольная; 11 – проемная труба; 12 – труба для отвода воды (перепускная); 13 – шланг смыва утечек раствора; 14 – пульт управления; 15 – рукав слива

Разработан комплект противовзрывной быстровозводимый, предназначенный для защиты горноспасателей от действия поражающих факторов воздушных ударных волн интенсивностью не более 0,06 МПа, которые могут возникнуть при взрыве газа и пыли в угольных шахтах. Определено, что в выработках с большой площадью поперечного сечения в качестве вспомогательных средств гашения воздушных ударных волн допускается использовать барьерные перемычки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, являющейся законченной научно-исследовательской работой, дано теоретическое обобщение и решение актуальной научно-технической проблемы повышения безопасности при изоляции пожаров в угольных шахтах путем установления закономерностей формирования взрывной среды при внезапных выделениях метана и нарушении проветривания в горных выработках, исследования процесса возникновения и развития цепной реакции горения, переходящего в воздушную ударную волну, изучения на основе газодинамического подхода параметров воздушных ударных волн, степени их подавления различными преградами и разработка на этой основе безопасных параметров взрывозащиты.

Основные научные и практические результаты, вытекающие из диссертационной работы состоят в следующем:

1. В диссертационной работе комплексно решена важная научно-техническая проблема повышения безопасности при изоляции пожарных участков в угольных шахтах на основе изучения процессов внезапного загазования горных выработок и формирования на этой основе взрывоопасной среды в шахтах. Разработана унифицированная математическая модель формирования, распространения и отражения воздушных ударных волн в сложной сети горных выработок при взрывах метана и пыли и создан на этой основе метод расчета безопасных расстояний от места возможного взрыва до места ведения горноспасательных работ; предложен метод расчета параметров взрывоустойчивых сооружений, их конструкций, способов и технических средств возведения.

2. Выполнено математическое моделирование процессов формирования взрывоопасной среды на аварийном участке через различные промежутки времени. Показано, что при определенном внезапном газовыделении взрывоопасная концентрация метана образуется на расстоянии до 900 м от лавы и сохраняется в течение более 1 ч, что связано с длительностью процесса десорбции метана из угля.

3. Разработана унифицированная математическая модель и предложен численный метод решения уравнений, описывающих процессы формирования и распространения воздушных ударных волн, отличающийся от известных ранее методов учетом цепной реакции быстрого горения.

4. Разработаны алгоритм и программа расчета распространения воздушных ударных волн в сложной сети горных выработок, отличающиеся от

ранее известных вычислением избыточных давлений и температур, учетом на них влияния отражения волн от различных препятствий и наложения при встрече из разных выработок.

5. Впервые получено и экспериментально проверено в натуральных условиях аналитическое и численное решение задачи взаимодействия воздушной ударной волны с изолирующими перемычками. Результаты исследований позволили установить максимально возможные давления на перемычки различных типов и конструкций.

6. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования гашения воздушных ударных волн пенными и породными пробками. Теоретически описано взаимодействие воздушных ударных волн с водяными и сланцевыми заслонами. Обоснованы параметры гашения воздушных ударных волн средствами огнепреграждения.

7. Разработана наиболее адекватная расчетная схема взрывоустойчивой перемычки с проемными трубами. Для решения задачи напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки использован метод, заключающийся в учете влияния на изгиб перемычки внутренних поперечных сил и энергии сдвига от них.

8. Установлено, что прочность перемычек с одной проемной трубой диаметром 0,8 м обеспечена при их возведении в выработках с площадью сечения 4...30 м<sup>2</sup>, с двумя аналогичными трубами, – начиная с 8 м<sup>2</sup>.

9. Обоснованы конструктивные параметры изолирующей взрывоустойчивой перемычки. Разработаны различные варианты крепления проемных труб в моноблоке взрывоустойчивых перемычек и каркасная опалубка многоразового действия для возведения взрывоустойчивых перемычек гидромеханическим способом толщиной от 1,6 до 4,5 м в горных выработках с площадью поперечного сечения 4...30 м<sup>2</sup>.

10. Обоснован выбор материалов, предназначенных для сооружения в шахтах гидромеханическим способом быстровозводимых взрывоустойчивых перемычек. В качестве основного материала приняты растворы на основе гипсового вяжущего. Разработаны различные добавки с пластифицирующим эффектом для улучшения характеристик растворов из гипсового вяжущего с целью замедления схватывания, повышения водостойкости сооружений и др.

11. Разработан комплект оборудования ОНР-1 для приготовления и перекачивания растворов производительностью до 10 м<sup>3</sup>/ч, который, по сравнению с существующими аналогами, имеет преимущества в приготовлении более качественных непластифицированных и пластифицированных быстротвердеющих растворов из гипсового вяжущего с требуемыми физико-механическими характеристиками.

12. Осуществлено опытно-промышленное внедрение результатов диссертационной работы. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения равен 6,6 млн грн.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Агеев, В.Г.** Безопасная отработка угольных пластов глубоких шахт длинными выемочными полями / В.Г. Агеев // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк - 2007. – Вып. 44. – С. 5 – 11.
2. **Агеев, В.Г.** Разгазирование тупиковых выработок в аварийных условиях / В.Г. Агеев // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2008. – Вып. 45. – С. 5 – 9.
3. Мнухин, А.Г. Закономерная связь между дебитом исходящих газов и состоянием горных выработок шахты после техногенной катастрофы / А.Г. Мнухин, А.М. Брюханов, **В.Г. Агеев** // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка, 2008. – № 1 (21). – С. 3 – 11.
4. **Агеев, В.Г.** Проблемы предотвращения и локализации взрывов метана в шахтах / В.Г. Агеев // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2009. – Вып. 46. – С. 5 – 10.
5. Мнухин А.Г. Методы безопасной оценки состояния горных выработок после техногенных аварий / А.Г. Мнухин, А.М. Брюханов, **В.Г. Агеев** // Уголь Украины. – 2009. – № 9. – С. 23 – 26.
6. **Агеев, В.Г.** Математическая модель формирования ударных волн в горных выработках при взрывах метана / В.Г. Агеев // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 5 – 10.
7. Взаимосвязи составов газов в шахтной атмосфере при тяжелых техногенных авариях / А.Г. Мнухин, А.М. Брюханов, **В.Г. Агеев**, П.С. Пашковский, С.Я. Махно, А.И. Панишко // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка, 2010. – Вып. 2 (26). – С. 5 – 24.
8. **Агеев, В.Г.** Математическая модель формирования и отражения ударных волн в сети горных выработок / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко, С.П. Греков // Вестн. Херсонского гос. ун-та: сб. науч. тр. – Херсон, 2011. – № 42. – С. 21 – 27.
9. **Агеев, В.Г.** Программно-вычислительный комплекс расчета безопасных мест ведения горноспасательных работ при взрывах метанопылевоздушной смеси в шахтах / В.Г. Агеев, А.А. Всякий, Т.Г. Салахутдинов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2011. – Вып. 48. – С. 5 – 13.
10. **Агеев, В.Г.** Підвищення стійкості кріплення прорізних труб при зведенні вибухостійких перемичок / В.Г. Агеев // Пожежна безпека: зб. наук. пр. / ЛДУ БЖД. – Львів, 2012. – № 20. – С. 187 – 192.
11. Способы оценки состава газов в шахтной атмосфере при тяжелых техногенных авариях / А.Г. Мнухин, А.М. Брюханов, **В.Г. Агеев**, П.С. Пашковский, С.Я. Махно, А.И. Панишко // Уголь Украины. – 2012. – № 8. – С. 23 – 30; № 9. – С. 38 – 44.

12. **Агеев, В.Г.** Методика определения параметров барьерных перемычек / В.Г. Агеев, В.И. Лебедев // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 5 – 10.
13. **Агеев, В.Г.** Управление вентиляцией при изоляции подземных пожаров / В.Г. Агеев // Уголь Украины. – 2012. – № 11. – С. 28 – 30.
14. **Агеев, В.Г.** Моделирование наложения и взаимодействия ударных волн на пути их движения при повторных взрывах / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, 2012. – С. 111 – 117.
15. **Агеев, В.Г.** Пути совершенствования оборудования для изоляции участков при пожарах в шахтах / В.Г. Агеев, Г.И. Пештибай // Наук. вісник УкрНДІПБ. – 2012. – № 1 (25). – С. 60 – 67.
16. **Агеев, В.Г.** Математическая модель напряженно-деформированного состояния шахтной взрывоустойчивой монолитной перемычки / В.Г. Агеев // Наук. вісник УкрНДІПБ. – 2012. – № 2 (26). – С. 165 – 172.
17. **Агеев, В.Г.** Численно-аналитические решения задачи распространения ударных волн при дозвуковых течениях газов / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко, С.П. Греков // Вестник Херсонского гос. ун-та: сб. науч. тр. – Херсон, 2012. – № 45. – С. 17 – 23.
18. **Агеев, В.Г.** Загазование тупиковых горных выработок после внезапных выбросов угля и газа / В.Г. Агеев, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Уголь Украины. – 2013. – № 6. – С. 11 – 13.
19. Численные и натурные эксперименты по гашению ударных волн в горных выработках огнетушащими порошками / **В.Г. Агеев**, С.П. Греков, И.Н. Зинченко, В.М. Плотников // Труды университета / КарГТУ. – Караганда, 2013. – № 2 (51). – С. 63 – 66.
20. **Агеев, В.Г.** Закономерности формирования взрывоопасной среды в горных выработках при газодинамических явлениях / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко // Вестник Науч. центра по безопасн. работ в угольной пром-ти: науч.-техн. журн. – 2013. – № 1 – 2. – С. 30 – 37.
21. **Агеев, В.Г.** Скачки скорости и давления газов при взрывах и сверхзвуковом течении газов на прямых участках выработки / В.Г. Агеев // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та: науч.-техн. журн. – 2013. – № 4. – С. 124 – 127.
22. **Агеев, В.Г.** Газовыделение из отторгнутого от массива угля и формирование взрывоопасных зон при внезапных выбросах угля и газа в тупиковых горных выработках / В.Г. Агеев, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. // Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, 2013. – С. 137 – 144.
23. **Агеев, В.Г.** Математическое моделирование формирования взрывоопасной среды в шахтах при газодинамических явлениях / В.Г. Агеев, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Вестник Херсонского нац. техн. ун-та. – Херсон, 2013. – Вып. 2 (47). – С. 13 – 17.
24. **Агеев, В.Г.** Математическое моделирование напряженного состояния шахтной взрывоустойчивой перемычки / В.Г. Агеев, И.Ф. Марий-чук //

Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza Safety & Fire Technique. – 2013. – Vol. 31, № 3. – P. 33 – 39.

25. Компьютерное моделирование развития, распространения и локализации взрывов метановоздушных смесей в горных выработках / **В.Г. Агеев**, С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Т.Г. Салахутдинов // Вісник Харківського нац. ун-ту: сб. наук. праць. – Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» – Вип. 21, № 1058. – Харків, 2013. – С. 512 – 518.

26. **Агеев, В.Г.** Напряженное состояние шахтной взрывоустойчивой перемычки с проемными трубами / В.Г. Агеев // Труды университета / КарГТУ. – Караганда, 2013. – № 3 (52). – С. 55 – 57.

27. **Агеев, В.Г.** Динамическое напряженно-деформированное состояние взрывоустойчивой перемычки / В.Г. Агеев, И.Ф. Марийчук // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 7 – 15.

28. **Агеев, В.Г.** Расчет конструктивных параметров оборудования для возведения изолирующих сооружений гидромеханическим способом в шахтах / В.Г. Агеев, Г.И. Пейтибай, Э.Г. Чайковская // Наук. вісник УкрНДІПБ. – 2013. – № 1 (27). – С. 212 – 218.

29. **Агеев, В.Г.** Взрывозащита при изоляции пожаров в угольных шахтах / В.Г. Агеев. – Донецк: Арпи, 2014. – 338 с.

30. **Агеев, В.Г.** Влияние метановых слоев на формирование ударных волн при пожарах в горных выработках / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: мат. 1-ї Міжнар. наук.-техн. конф. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – С. 29 – 33.

31. **Агеев, В.Г.** Взрывы метана и их моделирование при эндогенных пожарах в выработанных пространствах газообильных участков / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко // Пожежна безпека – 2011: мат. X Міжнар.наук.–практ. конф. 17 – 18 листоп. 2011 р. – Харків: НУЦЗ Укр., 2011. – С. 210 – 211.

32. **Агеев, В.Г.** Определение с помощью ЭВМ безопасных мест возведения изолирующих взрывоустойчивых перемычек при взрывах метанопылевоздушной смеси в шахтах / В.Г. Агеев, А.А. Всякий, Т.Г. Салахутдинов // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: мат. 2-ї Міжнар. наук.-техн. конф. 18 травня 2011 р. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 134 – 142.

33. **Агеев, В.Г.** Моделирование динамики ударных волн в сети горных выработок / В.Г. Агеев, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: тез. VII Междунар. конф. / Приднестровский ун-т. – Тирасполь, 2011. – С. 61.

34. **Агеев, В.Г.** Моделирование распространения ударных волн при мгновенной и цепной реакциях горения метана и пыли в горных выработках / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко // Форум гірників – 2012: матеріали Міжнар. конф.; 3 – 6 жовтня 2012 р.: в 4 т. Т.4. – Дніпропетровськ: НГУ, 2012. – С. 12 – 17.

35. **Агеев, В.Г.** Прогноз последствий действия волн давления при сотрясательном взрывании и вспышках метана в тупиковых выработках /

В.Г. Агеев // XXIV Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам пожарной безопасности: тез. докл.: в 3 ч. Ч. 3. – М.: ВНИИПО, 2012. – С. 294 – 296.

36. Современные материалы для возведения гидромеханическим способом изолирующих сооружений в шахте / **В.Г. Агеев**, Г.И. Пештибай, Э.Г. Чайковская, Н.А. Выпирайло // XXIV Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам пожарной безопасности: тез. докл.: в 3 ч. Ч. 3. – М.: ВНИИПО, 2012. – С. 365 – 367.

37. **Агеев, В.Г.** Газодинамический подход к вопросу формирования и распространения ударных волн в горных выработках / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: тез. VIII Междунар. конф. / Приднестровский ун-т. – Тирасполь, 2013. – С. 39.

38. Открытие, диплом № 44-S. Закономерная связь между состоянием горных выработок в угольной шахте после техногенной аварии и дебитом выделяющихся газов / А.Г. Мнухин, А.М. Брюханов, **В.Г. Агеев**. – Заявка на открытие № А-500 от 17 июня 2009 г.; приоритет 2008 г., сб. науч. тр. МакНИИ «Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах», 2008, вып. 21; зарегистр. 20.08.2010, № 500.

39. Открытие, диплом № 53-S. Закономерная связь между характером техногенных процессов и составом газов в подземных горных выработках / А.Г. Мнухин, А.М. Брюханов, **В.Г. Агеев**, П.С. Пашковский, С.Я. Махно, А.И. Панишко. – Заявка на открытие № 570 от 14 апреля 2013 г.; приоритет 27.09.2012, журнал «Уголь Украины», 2012, № 9; зарегистр. 07.06.2013, № 570.

40. Пат. № 61305 Україна, МПК А62В 19/00. Регенеративний респіратор з хімічно зв'язаним киснем / **В.Г. Агєєв**, Е.Г. Ільїнський, Є.І. Конопелько, П.С. Пашковський, Р.С. Плетенецький; заявник і власник патенту НДІ гірничорятувальної справи та пожежної безпеки «Респіратор». – № 201101708; заявл. 14.02.2011; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.

41. Пат. № 62838 Україна, МПК А62С 1366. Порошковий вогнегасник / В.Ф. Паращевін, С.Г. Філімонов, **В.Г. Агєєв**, В.М. Копитков, А.Л. Кудряшов, Г.О. Філіпенко; заявник і власник патенту НДІ гірничорятувальної справи та пожежної безпеки «Респіратор». – № 201107152; заявл. 06.06.2011; опубл. 12.09.2011, Бюл. № 17.

42. Пат. № 68688 Україна, МПК А62В 7/08. Груповий ізолювальний дихальний апарат з хімічно зв'язаним киснем / **В.Г. Агєєв**, В.В. Говжєєв, Е.Г. Ільїнський, Є.І. Конопелько, П.С. Пашковський, Р.С. Плетенецький, Ю.А. Шип; заявник і власник патенту НДІ гірничорятувальної справи та пожежної безпеки «Респіратор». – № 201110306; заявл. 23.08.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.

43. Пат. № 71386 Україна, МПК А62В 21/00. Пусковий пристрій ізолювального дихального апарата / **В.Г. Агєєв**, Е.Г. Ільїнський, М.М. Ковалєвська, С.В. Олейніков, Є.В. Попов, Ю.Є. Співак; заявник і власник патенту НДІ гірничорятувальної справи та пожежної безпеки «Респіратор». – № 201200126; заявл. 04.01.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.



## АННОТАЦИЯ

Агеев В.Г. Научные основы создания способов и средств локализации ударных волн при ведении горноспасательных работ по изоляции пожаров в шахтах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.01 – «Охрана труда». – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет». Донецк, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы – обеспечению безопасности горноспасательных работ при изоляции пожаров в шахтах.

По результатам выполненных работ и их анализа показано, что в вопросах загазования и взрывов в горных выработках особую актуальность имеют исследования:

характера протеканий взрыва газа и угольной пыли;

характера формирования и распространения воздушных ударных волн по прямолинейным участкам выработок и на сопряжениях;

взаимодействия воздушных ударных волн с различными препятствиями; подавления воздушных ударных волн различными средствами.

Предложена математическая модель, получено численное решение задачи и выполнено математическое моделирование распространения воздушных ударных волн в тупиковых и сквозных выработках при заранее заданном давлении после взрыва в каком-либо месте.

Рассмотрен процесс формирования и распространения воздушных ударных волн при цепной реакции горения и теплообмене со стенкой выработки. Показано, что физике процесса соответствует требование задавать количество тепловой энергии в каком-либо месте выработки с быстрым распространением пламени вдоль загазованной зоны. Это позволило производить численные расчеты распределения параметров плотности, скорости, температуры и давления вдоль тупиковых и сквозных выработок при взрывах большой и малой мощности и цепной реакции горения, используя систему уравнений течения газов при взрывах.

Исследован процесс взаимодействия воздушных ударных волн с различными преградами и средствами взрывозащиты, в том числе пенными и породными пробками, водяными заслонами.

Предложен способ определения параметров воздушных ударных волн и безразмерных расстояний при взрывах метана.

Впервые разработана математическая модель напряженно-деформированного расстояния взрывоустойчивой перемычки в виде толстой пластины (плиты) с однородными и неоднородными граничными условиями под действием нагрузок от воздушной ударной волны и разрушенных горных пород кровли, позволившая определить ее толщину в зависимости от механических параметров материала, сечения и глубины расположения выработок. На базе полученных результатов разработана технология и обоснованы параметры технических средств гашения воздушных ударных волн.

**Ключевые слова:** шахта; авария; взрыв газа и угольной пыли; газодинамическое явление; воздушная ударная волна; взрывоустойчивая перемычка; безопасные расстояния.

## ANNOTATION

Ageyev V.G. Scientific fundamentals of creation of methods and means of localization of shock waves by carrying-out the mine-rescue operations on isolation of fires in mines. – Manuscript.

Thesis for a degree of Doctor of Technical Sciences on the speciality 05.26.01 - «Labour protection» - The Governmental Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”, Donetsk, 2016.

The thesis is devoted to the solution of an actual scientific-technical problem, i.e. protection of the mine-rescue operations by isolation of the fires in the mines.

According to the results of the works fulfilled and their analysis it is shown that the investigations of:

character of developments of gas and coal dust explosions;

character of formation and spread of air shock waves along the straight portions of the mine workings and at conjugations;

interaction of the air shock waves with various obstacles;

suppression of the air shock waves with various means

have the special actuality in the problems of gas-pollution and explosions in the mine workings.

The mathematical model was proposed, the numerical solution of the problem was received, and the mathematical modelling of the spread of the air shock waves in the blind drifts and through mine workings at the predetermined pressure after the explosion in some place was made.

The process of the formation and spread of the air shock waves by the combustion chain reaction and the heat exchange with the wall of the mine working was considered. It is shown that the requirement to specify the heat energy quantity in some place of the mine working with the fast flame propagation along the zone gas-polluted conforms to the physics of the process. It allowed performing the numerical calculations of distribution of the density, velocity, temperature and pressure parameters along the blind drifts and through mine workings by the powerful and not strong explosions and the combustion chain reaction using the set of equations of gas flows by the explosions.

The process of interaction of the air shock waves with various obstacles and explosion protection means including foam and rock plugs, water barriers, was investigated.

The method of determination of the parameters of the air shock waves and dimensionless distances by the methane explosions was proposed.

The mathematical model of the deflected mode of the explosion-stable stopping in the form of a thick plate having homogeneous and inhomogeneous boundary conditions under the influence of the loads owing to the air shock wave and the roof rocks broken that allowed determining its thickness depending on the

mechanical parameters of the material, section and depth of disposition of the mine workings was worked out for the first time.

On the basis of the results received the technology was worked out, and the parameters of the technical means to damp the air shock waves were substantiated.

**Keywords:** mine; accident; gas and coal dust explosion; gas dynamical phenomenon; air shock wave; explosion-stable stopping; safe distances.

Подписано в печать 20.07.2016. Формат 60×90<sup>1</sup>/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура таймс. Усл. печ. л. 2,0. Печать лазерная. Заказ № 11. Тираж 100 экз.

---

НИИГД «Респиратор». 283048, Донецк, ул. Артема, 157  
Тел. (062) 311-69-52. URL: <http://respirator.dnmchs.ru>