

УДК 621.3: 622

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ГОРНОМ МАССИВЕ  
И ФОРМИРОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТОЙ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ  
СРЕДЫ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

**д.т.н. Брюханов А.М. (МакНИИ)**

*Викладено результати досліджень МакНДІ в галузі газодинамічних явищ як процесів, що відбуваються в гірському масиві і призводять до утворення вибухового середовища в гірничих виробках. Наведено результати робіт щодо вдосконалення способів і засобів запобігання вибухам метану та пилу у вугільних шахтах.*

**GAS-DYNAMIC EVENTS IN ROCK STRATA AND FORMATION  
OF EXPLOSIVE AIR-METHANE MIXTURES IN COAL MINES**

**Bryukhanov O.M.**

*Findings of MakNII research in gas dynamic events as processes occurring in rock strata and resulting in the formation of explosive methane-air mixtures underground are provided below. Improved means and techniques for preventing gas/dust explosions in coal mines are described.*

Опыт подземной разработки угольных месторождений показал, что в горном массиве могут происходить газодинамические явления (ГДЯ), связанные с формированием взрывчатой метано-воздушной среды и с возможностью взрывов в горных выработках. К ГДЯ относятся внезапные выбросы угля, породы и газа, внезапные обрушения и вывалы (выдавливания). Выбросы могут происходить как в силу возникающих напряженных процессов в горном массиве, так и при проведении сотрясательного взрывания по породе или полезному ископаемому, когда такое взрывание осуществляется как мера по предупреждению непредсказуемого внезапного выброса при нормальном режиме работы по добыче угля или по проходке горных выработок.

На основании обобщения имеющихся данных предложено современное разделение шахтопластов по категории опасности по различным видам газодинамических явлений и сформулированы признаки распознавания газодинамических явлений, происходящих в угольных шахтах и сопровождающихся выделением большого объема метана. Показано, что проявление выбросоопасности и других ГДЯ определяется глубиной разработки, газонасыщенностью угольного и породного массива, его напряженно-деформированным состоянием, физико-механическими свойствами массива и углом падения пласта. Проявление газодинамических явлений носит локальный характер. Зоны ГДЯ характеризуются высокой нарушенностью структуры пласта, повышенной изменчивостью его мощности, прочностных свойств отдельных

пачек в сторону понижения их прочности, повышенной скоростью десорбции и повышенной начальной скоростью газовыделения.

Проанализированы 20 характерных внезапных выбросов, происшедших на шахтах Донбасса с 1967 по 2002 годы, а также 1512 газодинамических явлений, происшедших на шахтах Украины за период с 1991 по 2000 гг.

По результатам обработки по критерию Колмогорова статистических данных (табл. 1) определены доверительные интервалы и показано, что с вероятностью 0,99 очередное ГДЯ в угольной отрасли можно ожидать через 52 ч после ранее происшедшего, а очередной выброс – через 250 ч. Это позволяет своевременно намечать меры безопасности по предупреждению газодинамических явлений.

Таблица 1

**Статистические параметры потока ГДЯ**

Наименование газодинамического явления	Интенсивность потока, 1/час	Математическое ожидание, час
Внезапные выбросы	$5,82 \cdot 10^{-4}$	1724
Внезапные обрушения	$5,6 \cdot 10^{-4}$	1786
Внезапные вывалы (выдавливания)	$7,4 \cdot 10^{-4}$	1351
Выбросы при дистанционном управлении	$2,1 \cdot 10^{-3}$	476
Выбросы при сотрясательном взрывании по углю	$1,01 \cdot 10^{-2}$	99
Выбросы при сотрясательном взрывании по породе	$7,9 \cdot 10^{-4}$	1266
Все вместе взятые ГДЯ	$1,7 \cdot 10^{-2}$	52

Предложено объем метана, выделившегося при ГДЯ, определять на основании замеров концентрации метана и расхода воздуха в исходящих вентиляционных струях тупиковых выработок, выемочного участка, крыла или шахты, где произошло ГДЯ. Концентрация метана при этом определяется по диаграммным лентам аппаратуры автоматического контроля метана (АКМ). Расход воздуха в месте установки датчика метана – по диаграммам самопишущих приборов телеконтроля расхода воздуха или по данным «Вентиляционного журнала».

Для обоснования основных положений методологии математического моделирования процесса загазирования рассмотрен выброс угля и газа, происшедший на выемочном участке, с учетом влияния на режим вентиляции газовыделения и частичного или полного заполнения горной массой конвейерной выработки (рис. 1).

На основе теории переноса метана воздушным потоком, описывающей неравномерное распределение его по высоте, длине и ширине выработки, получено общее выражение для определения зависимости концентрации метана ( $C_{x,y}$ ) от влияющих факторов: интенсивности газовыделения ( $I$ ), количества воздуха ( $Q_0$ ), его скорости ( $u$ ), коэффициента турбулентной диффузии ( $D_y$ ):

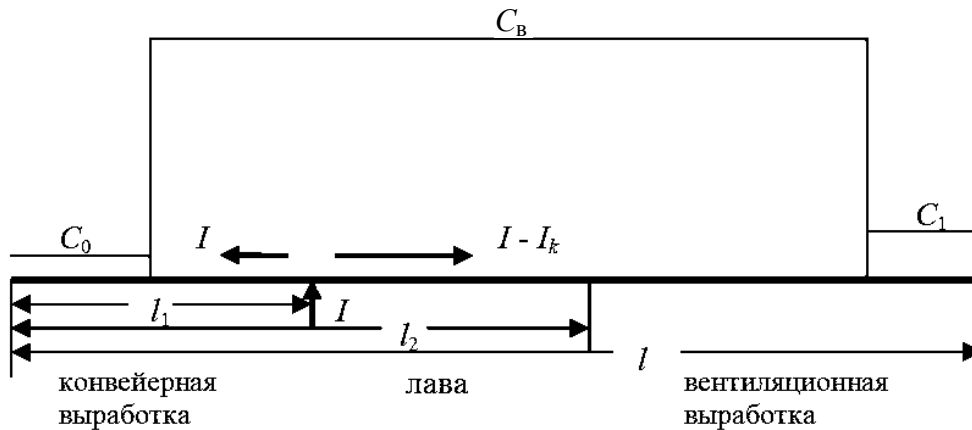


Рис. 1. Схема заполнения метаном выработок выемочного участка в момент выброса породы, угля и газа

$$C(x, y) = C_0 + \frac{I_{\text{пл}} + kI_{\text{вл}} + \int_0^x j_{\text{вл}}(\xi) d\xi}{kQ_0} + \frac{I_{\text{сл}}}{ub\sqrt{\pi D_y x / u}} \exp\left(-\frac{uy^2}{4D_y x}\right), \% \quad (1)$$

где  $I_{\text{пл}}$ ,  $I_{\text{вл}}$ ,  $I_{\text{сл}}$  – газовыделение (дебит метана) соответственно из пласта, выработанного пространства в лаву, и образующее слоевое скопление метана у кровли,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $x$ ,  $y$  – координаты выработки по длине и высоте,  $\text{м}$ ;  $j_{\text{вл}}$  – интенсивность источников газовыделения из выработанного пространства,  $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ;  $b$  – аэродинамическое сопротивление вентилятора главного проветривания, отнесенное к рассматриваемому участку выработки,  $\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$ ;  $k$  – коэффициент уменьшения расхода воздуха, вызванного выбросом.

При выбросе в лаве установлена зависимость между объемом выброшенного газа ( $V_m$ ) и массой угля  $G$  (рис. 2), и показано, что на каждую тонну выброшенного угля приходится в среднем  $33 \text{ м}^3$  метана.

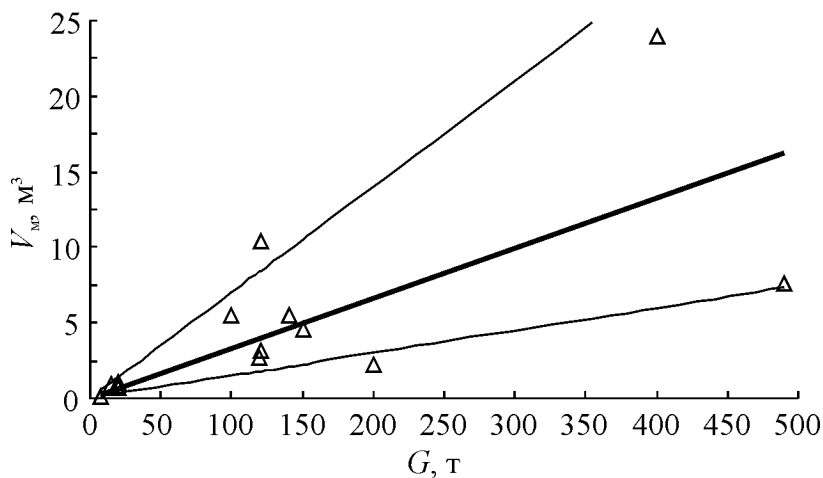


Рис. 2. Соотношение между выброшенной массой угля и объемом газа в лавах (тонкими линиями указан диапазон разброса данных)

Исходя из среднестатистической интенсивности выбросов угля, для конкретной выработки и шахты предложена формула для определения ожидаемой интенсивности выброса метана ( $I$ ) в зависимости от количества выброшенного угля ( $G$ ), его природной метаноемкости ( $q_n$ ) и продолжительности выброса ( $t_0$ ):

$$I = Gq_n/t_0, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

Как результат математического моделирования, получены зависимости для определения приращения концентрации метана в зависимости от влияющих факторов, максимальное значение которого выражается формулой

$$\Delta C_m = 50 \frac{l_e + l_k}{\sqrt{\pi D_x t_k}}, \%, \quad (3)$$

где  $l_e$  и  $l_k$  – длина зоны загазирования вентиляционной и конвейерной выработок, м;  $t_k$  – время однократного обмена воздуха в объеме выемочного участка, с.

В результате сокращения расхода воздуха на выемочном участке, вызванного перекрытием части поперечного сечения выработки выброшенной горной массой и углем, происходит образование слоевых скоплений в вентиляционной выработке, начиная от окна лавы.

Для прогноза длины слоя метана ( $l$ ) при концентрации его 5% в конце слоя под кровлей выработки предложена подтвержденная экспериментальными данными эмпирическая формула:

$$l = \frac{2560I_{СП}}{u^3 S^{1,5} (5 - C_{cp})^2}, \text{ м}, \quad (4)$$

где  $I_{СП}$  – дебит метана, образующего слой, м<sup>3</sup>/мин;  $u$  – скорость движения воздуха, м/с;  $C_{cp}$  – средняя концентрация метана в выработке, %;  $S$  – площадь поперечного сечения выработки, м<sup>2</sup>.

При выбросе угля и газа в тупиковых выработках установлено, что зависимость объема газа от массы выброшенного угля выражается линейной функцией: на каждую тонну угля приходится в среднем 35 м<sup>3</sup> метана ( $q_{cp} = 35 \text{ м}^3/\text{т}$ ), а крайние значения, характеризующие разброс данных, соответственно равны 20 и 60 м<sup>3</sup>/т.

Среднестатистическое количество угля, выброшенного в тупиковые выработки, оказалось равным  $G_{cp} = 67 \text{ т}$ .

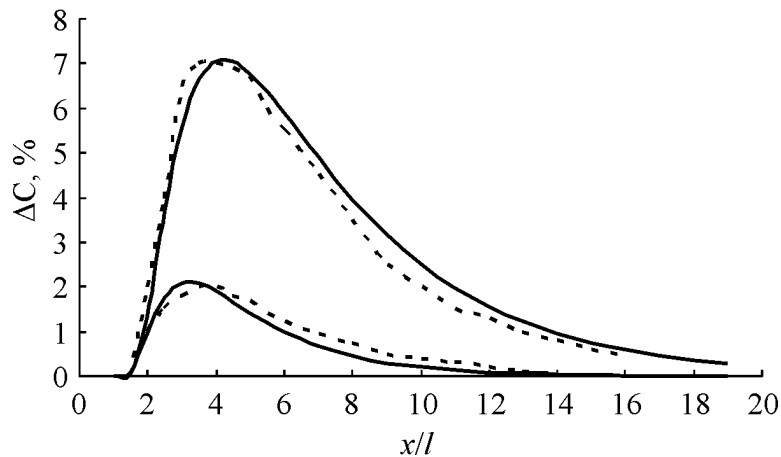
Газодинамическое явление в тупиковой выработке приводит к заполнению её части породой и углем и к практически мгновенному загазированию определенного объема выработки до стопроцентной концентрации метана. Математическое моделирование процесса загазирования показало, что моментально загазирывается от тупикового забоя 200 м выработки, после чего начинает заполняться вся остальная её часть.

Максимальные значения приращения концентрации метана по длине проветриваемой выработки определяются по выражению

$$\Delta C_m = 50 \frac{l_B}{\sqrt{\pi D_x t_{кр}}}, \% \quad (5)$$

где:  $t_{кр}$  – время однократного обмена воздуха от места выброса до заданного расстояния от забоя тупиковой выработки, с;  $l_B$  – расстояние по длине выработки от места выброса до рассматриваемой точки, м.

Динамика изменения концентрации метана во времени (рис. 3) свидетельствует о том, что уже через 3-4 мин. после выброса концентрация метана становится максимальной и в зависимости от массы выброшенного угля может составлять больше 5%.

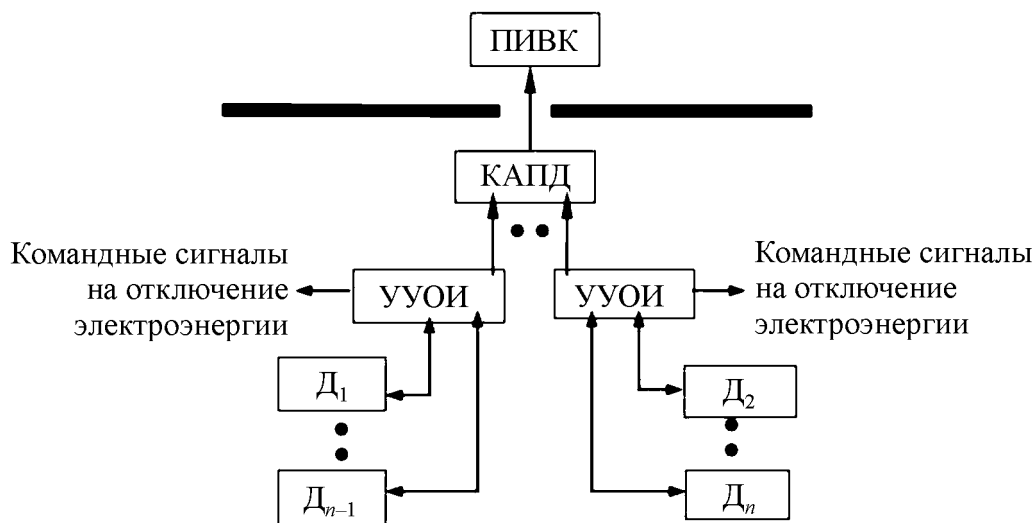


**Рис. 3.** Появление газовой волны в тупиковых выработках на расстояниях от забоя 61 и 66 м при выбросах песчаника и газа (сплошные линии – расчётные данные, штриховые линии – экспериментальные данные)

Поскольку условия загазирования при газодинамических явлениях зависят от многих влияющих факторов, обоснован алгоритм компьютерного расчета параметров загазирования по полученной формуле (1), трансформируемой в зависимости от вида ГДЯ и его условий.

Обоснованы структурная схема газового мониторинга горных выработок (рис. 4) и принципы построения и функционирования системы информационного обеспечения на базе аппаратуры газового контроля и разработанного комплекса КАГИ. Комплекс КАГИ объединяет в единую систему датчики контроля и первичные преобразователи метана (Д), исполнительную аппаратуру, измерители скорости воздуха, устройство ТУ «Ветер» и компьютерный контроллер обработки информации, поступающей от подземных источников сигналов по линиям связи. Комплекс КАГИ позволяет регистрировать и сохранять на магнитных носителях динамику изменения и последовательность всех событий, характеризующих аэрогазовую обстановку, а также выдавать рекомендации и предупреждать об опасности, т.е. выполнять функ-

цию «черного ящика». Это позволяет детально и объективно выполнять анализ причин и обстоятельств аварийных ситуаций для принятия мер по предупреждению и предотвращению взрывов в шахтах.



**Рис. 4.** Структурная схема технического обеспечения газового мониторинга горных выработок: ПИВК – поверхностный информационно-вычислительный комплекс; КАПД – каналобразующая аппаратура передачи данных; УУОИ – устройство управления и обработки информации; Д<sub>1</sub>–Д<sub>n</sub> – датчики СН<sub>4</sub>, О<sub>2</sub>, СО, Н<sub>2</sub> и других газов

Разработана структура модуля противоаварийной защиты на базе комплекса КАГИ и унифицированной телекоммуникационной системы диспетчерского контроля и автоматизированного управления горными машинами и технологическими комплексами – УТАС с возможностью привязки к автоматизированной системе противоаварийной защиты шахт – АСПАЗШ (рис. 5). Это позволяет стратегически изменить сложившуюся ситуацию в предупреждении и локализации аварий рода «Взрыв».

На основе анализа разработанных ранее систем и средств взрывоподавления при применении буровзрывных работ создана автоматическая система взрывоподавления и локализации взрыва АСВП-ЛВ, основанная на применении взрывоподавляющих порошков, которая позволяет усовершенствовать взрывоподавление, основанное на применении сланцевых и водяных заслонов.

В системе обеспечения предотвращения взрывов при ведении БВР в шахтах предложен новый искробезопасный взрывной прибор типа ПВ-50, позволяющий одновременно взрывать до 50 зарядов ВВ.

Для гашения вспышек газа и (или) пыли в начальной стадии их появления обоснованы параметры и вместе с изготовителем – заводом КЭМЗ освоено производство системы автоматической взрывозащиты СЛВА.1 и СВША.1 с применением специального датчика, реагирующего на светоизлучение при вспышке, и специально разработанного огнетушащего вещества (экологически чистого порошка ПВК-1).

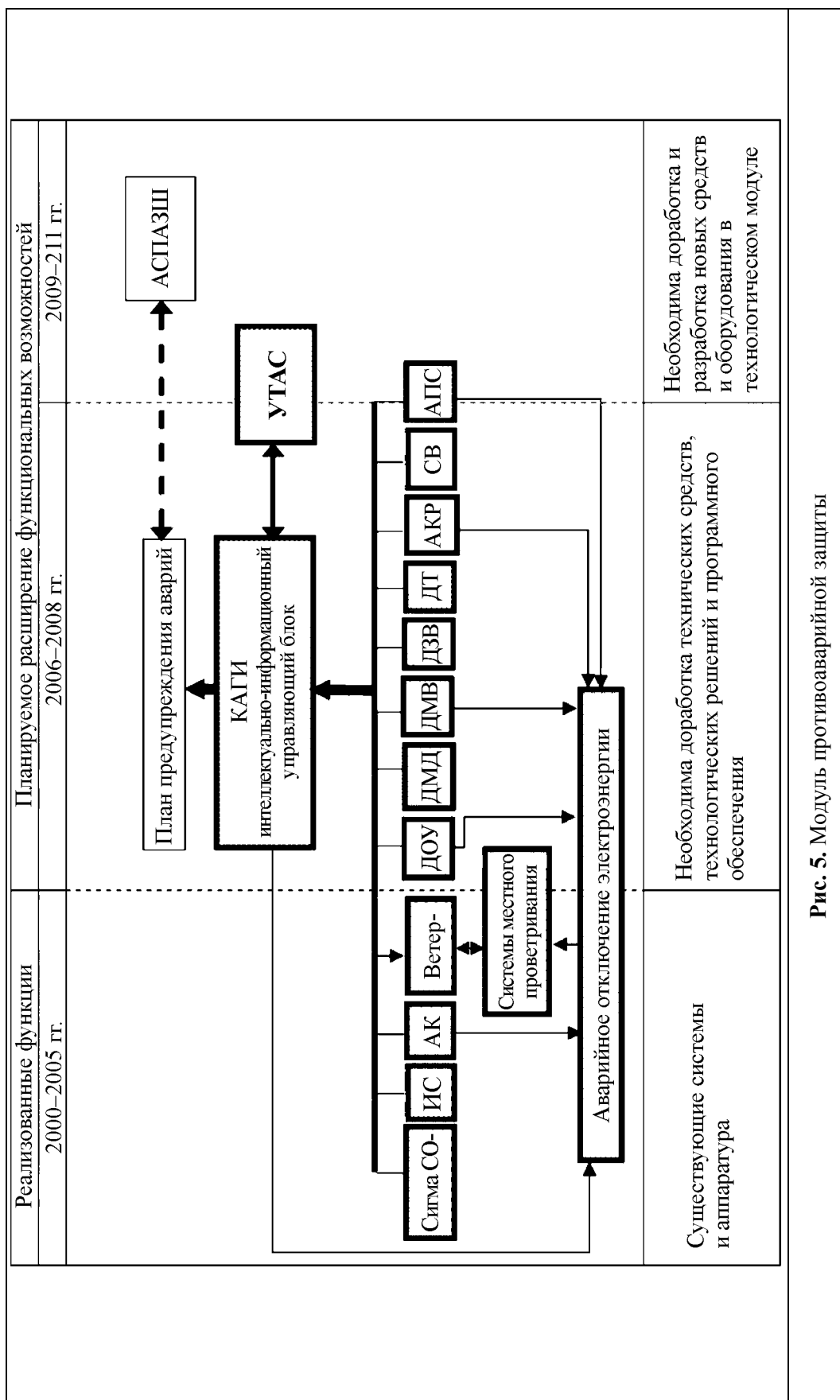


Рис. 5. Модуль противоаварийной защиты

Результатами выполненных исследований подтверждена его эффективность как средства предотвращения распространения взрыва.

Для исключения случаев блокирования функции отключения электроэнергии и фальсификации информации о работе средств АГЗ предложено использовать организационные меры и метод многофакторного учета данных, поступающих от датчиков аэрогазового и технологического контроля, позволяющий выявлять аномальное изменение сигналов и обнаруживать не санкционированное вмешательство в работу средств АГЗ.

На основе уточненных нижнего и верхнего пределов взрывчатости и особенностей взрыва угольной пыли обоснован принцип оперативного контроля пылевзрывобезопасности горных выработок и построения датчика пылеотложения на принципе регистрации резонансной частоты колебаний электромагнитного поля. Такой датчик включен в состав автоматической системы пылевзрывозащиты СВША. 1. Обоснована структура системы защиты, основанной на адаптации СВША с комплексом КАГИ.

Выполнена социально-экономическая оценка последствий взрывов на угольных шахтах. Предложено затраты на восстановление объектов шахты, поврежденных или разрушенных в результате взрыва, определять по выражению

$$Z = \sum_1^i N_i C_i + Q_n C_n + S_k C_k + \sum_1^k Z_m, \text{ грн}, \quad (6)$$

где:  $N_i$  – количество единиц вышедшего из строя горно-шахтного оборудования по наименованиям от 1-го до  $i$ -го (пускатели, машины, кабели и др.) в физических единицах, шт., м и т.п.;  $C_i$  – закупочная цена единицы оборудования, приобретаемого для замены вышедшего из строя по наименованиям от 1-го до  $i$ -го, грн.;  $Q_n$  – объем породы в завалах, образовавшихся в результате повреждения выработок, т;  $C_n$  – стоимость уборки и погрузки 1 т породы, включая транспортные расходы, грн/т;  $S_k$  – объем перекрепления разрушенных выработок в результате взрыва, м;  $C_k$  – стоимость работ по перекреплению выработок, включая стоимость приобретения или замены поврежденных элементов крепи, грн/м;  $Z_m$  – прочие затраты в денежном исчислении на выполнение демонтажно-монтажных работ по оборудованию, затраты на ремонтные работы по восстановлению разрушенных дверей, переемычек, кроссингов и др., грн.

Обоснована возможность оценивать затраты, связанные с гибелью людей. Доказано, что в среднем суммарный экономический ущерб от последствий взрыва на угольной шахте составляет от 11,2 млн. грн. до 29 млн. грн.

## ВЫВОДЫ

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

1. Исследованы статистические закономерности газодинамических явлений и установлены законы распределения этих явлений, показано, что газо-



динамическое явление в отрасли можно ожидать через каждые 52 часа, а внезапный выброс – через 250 часов с вероятностью этих аварийных событий, равной 0,99.

2. Обоснована математическая модель процессов загазирования горных выработок и формирования взрывоопасной среды при газодинамических явлениях, учитывающая влияние выбросов породы, угля и газа, а также влияние прорывов метана на устойчивость проветривания выработок аварийного участка и размер зоны загазирования.

3. На основании выполненных исследований разработана методология компьютерного расчёта параметров загазирования горных выработок и формирования взрывоопасной среды при газодинамических явлениях, обоснован алгоритм, блок-схема и программа компьютерного расчёта с использованием стандартных и типовых программных пакетов.

4. Предложена структурная схема обеспечения газового мониторинга, состоящего в том, что информация о содержании опасных газов, получаемая от датчиков и первичных преобразователей, поступает на устройства управления и обработки информации, установленные в шахте, и затем посредством каналобразующей аппаратуры передачи данных – в разработанный информационно-вычислительный комплекс КАГИ; командные сигналы на отключение электроэнергии выдаются непосредственно от устройств управления и обработки данных, а телеинформация поступает в контроллер оператора АГК с возможностью отображения её на компьютерном мониторе и распечатки на принтере.

5. Исходя из установленных в работе недостатков пассивных водяных или сланцевых заслонов, состоящих в недостаточной их надёжности и ограниченных возможностях при больших скоростях распространения взрыва, обосновано применение более совершенных автоматизированных средств взрывозащиты, а также предложены меры по повышению их эффективности, реализованные в разработанной системе СВША с датчиками контроля пылеотложения.

6. Предложена общая методология оценки ущерба, вызываемого взрывом метана или угольной пыли в шахте, и показано, что экономический ущерб в среднем от одного взрыва может составлять более 10 млн. гривен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюханов А.М. Научно-технические основы расследования и предотвращения аварий на угольных шахтах. – Донецк: Норд-Пресс, 2004. – 347 с.
2. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах / А.М. Брюханов, А.Г. Мнухин, В.П. Колосюк, В.И. Бережинский, В.П. Коптиков, К.К. Бусыгин, Ю.Т. Хорунжий. – Донецк: Норд-Пресс, 2004. – Ч. I – 548 с.
3. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах / А.М. Брюханов, А.Г. Мнухин, В.П. Колосюк, В.И. Бережинский, В.П. Коптиков, К.К. Бусыгин, Ю.Т. Хорунжий. – Донецк: Норд-пресс, 2004. – Ч. II – 632 с.