

УДК 622.831.242: 539.3

Минеев С.П., д-р техн. наук, профессор,
Шиповский И.Е., канд. техн. наук
 (ИГТМ НАН Украины),
Киселев В.В., магистр
 (ГП «УК «Краснолиманская»),
Гулай А.А., магистр
 (ПАО «ШУ «Покровское»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ВЫБРОСООПАСНОГО МАССИВА ПРИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ В ПРОВОДИМОЙ ВЫРАБОТКЕ

Мінеєв С. П., д-р техн. наук, професор,
Шиповський І.Є., канд. техн. наук
 (ІГТМ НАН України),
Кисельов В.В., магістр
 (ДП «ВК «Краснолиманська»),
Гулай О.О., магістр
 (ПАТ «ШУ «Покровське»)

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ВИКИДОНЕБЕЗПЕЧНОГО МАСИВУ ПРИ ВИБУХОВИХ РОБОТАХ У ВИРОБЦІ, ЯКА ПРОВОДИТЬСЯ

Mineev S.P., D.Sc. (Tech), Professor,
Shipovskii I. E., Ph.D. (Tech.)
 (IGTM NAS of Ukraine),
Kiselev V.V., M.S. (Tech.)
 (SE «MC» Krasnolimanskaya),
Gulay A.A., M.S. (Tech.)
 (PJSC «CG «Pokrovskoye»)

SIMULATION OF OUTBURST-PRONE MASSIF BEHAVIOR DURING BLASTING OPERATIONS IN THE COALFACE

Аннотация. Рассмотрена работоспособность метода сглаженных частиц (SPH) для расчета напряженно - деформированного состояния (НДС) углепородного массива с учетом возможности возникновения выброса. Основной задачей было получение качественных результатов последствий проведения выработки буровзрывным способом в горном массиве вблизи выбросоопасного угольного пласта.

Исследование показало, что использование предложенного подхода при моделировании поведения горного массива с выработкой открывает возможность адекватного описания внезапных выбросов. Подтверждена целесообразность представления выбросоопасного угольного пласта посредством энергонасыщенной среды. Основываясь на результатах расчетов для выбранной схемы взрывного проведения выработки можно выявить момент и место зарождения выброса и оценить последствия заполнения пространства выработки выбрасываемыми осколками горного массива. Полученные результаты могут быть применены к дальнейшему изучению явлений выброса. Дальнейшие исследования необходимы, чтобы перейти от качественных результатов к получению количественных характеристик для различных

вариантов параметров схем проведения выработок, систематизированная обработка которых позволит получить инженерные методики.

Ключевые слова: выброс, углепородный массив, горная выработка, SPH-метод моделирования.

Актуальность. При ведении горных работ в глубоких угольных шахтах нередко происходят газодинамические явления (ГДЯ). В последнее время классифицировано порядка 15 ГДЯ, из которых наиболее опасным для работающих шахтеров является внезапный выброс угля и газа [1]. Одним из таких явлений является внезапный выброс угля и газа, происходящий из мгновенно разрушенной породы кровли (почвы) при проведении выработки вблизи выбросоопасного пласта. Следует отметить, что к настоящему времени вопросы отработки выбросоопасных угольных пластов достаточно четко регламентируются существующими нормативными документами [2]. Однако состояние выбросоопасного угольного пласта и вмещающих его пород как единого целого изучено недостаточно. На практике при ведении горных работ в угольных шахтах имеют место газодинамические явления (ГДЯ) при расположении выбросоопасного пласта вблизи проводимой горной выработки [3]. Правилами безопасности (ПБ) безопасные расстояния от контура выработки до пласта с учетом степени его выбросоопасности и других характеристик углевмещающих пород к сожалению определяются недостаточно корректно. Так, неоднократно имели место ГДЯ при ведении горных работ в рассматриваемых условиях [3].

Кроме изложенного следует отметить, что к настоящему времени выполнено достаточно большое количество аналитических исследований механизма реализации ГДЯ [4- 9 и др.]. Одни методики были основаны на учете преобладающего влияния на процесс газового фактора, другие – напряженно-деформированного состояния, третьи физико-механических свойств. Были выполнены работы с попытками учета нескольких факторов одновременно путем учета гетерогенности среды [10- 13 и др.] и т.д. Однако корректного решения с учетом одновременно всех или большинства факторов, характеризующих явление, получено не было. И, к сожалению, до настоящего времени, все факторы, хотя бы частично учитывающие явления, не были подтверждены расчетными методами моделирования. Поэтому авторами была выбрана методология позволяющая использовать новый подход численного математического моделирования реализации процесса ГДЯ с использованием новой модели выбросоопасного пласта.

Таким образом, актуальность исследований по оценке состояния углепородного массива вблизи выбросоопасного пласта для уточнения безопасных параметров заложения выработки с использованием новых методологических подходов очевидна.

Цель: определение возможностей выбранного расчетного подхода на основе метода сглаженных частиц (SPH) к решению задач прогноза выбросоопасности горного массива вблизи проводимой выработки и апробация оригинального физико – механического подхода для описания выбросоопасного угольного пласта, суть которого состоит в том, что пласт представляется некоторым энер-

гонасыщенным материалом.

Методика. С помощью компьютерного моделирования методом сглаженных частиц SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) исследуется поведение массива горной породы при взрывной проходке горной выработки, которая была заложена вблизи выбросоопасного угольного пласта. Определяются основные параметры: распределение напряжений, возникающих при нагружении, а также образование областей разрушения и возможности эволюции выброса. В теоретической части исследования проведен выбор модели рассматриваемых процессов, поставлена краевая задача, предложен метод ее решения. Предыдущие исследования показали [14], что применение метода сглаженных частиц в задачах геотехнической механики достаточно эффективно. Данные для исследования о ВВ и других параметров были взяты из нормативных документов и литературных источников по свойствам горного массива и проведению буровзрывных работ в шахтах [2, 14, 16]. Это исследование было проведено на компьютере средней мощности. Расчет потребовал порядка 10 часов. В эмпирической части исследования основной задачей было прояснить причины возникновения выброса при рассматриваемой схеме проведения выработки. Практическая часть выполнена путем компьютерного моделирования поставленной краевой задачи, анализа полученного НДС горного массива и волновой картины в породе, угольном пласте и вмещающих его породах. Основной задачей на 1-м этапе исследований было получение качественных результатов последствий проведения выработки взрывным методом в горном массиве вблизи выбросоопасного угольного пласта.

Результаты. Исследования выполнялись в инициативном порядке. Полученные результаты проясняют некоторые аспекты реализации внезапного выброса при ведении горных работ. Получены картины разрушения зарядами ВВ массива горной породы при проведении выработки вблизи выбросоопасного угольного пласта. Использование метода сглаженных частиц позволяет по выбранной методологии отследить зарождение и развитие выброса.

Научная новизна. Реализована впервые оригинальная вычислительная технология для решения рассматриваемого класса задач, обоснована и сформулирована модель пласта как некоторой энергонасыщенной среды.

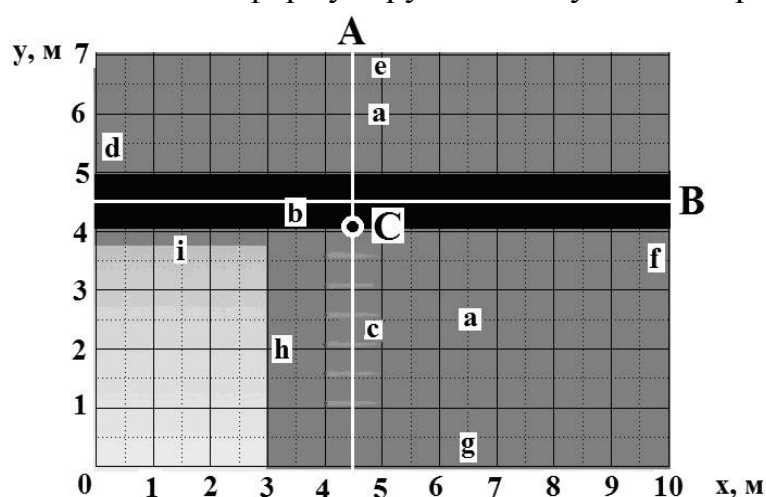
Практическая значимость. Научная и практическая ценность работы заключается в исследовании явления выброса в горном массиве, динамики углепородного массива и его состояния. Впервые предложенный авторами подход компьютерного моделирования дает исследователям инструмент, который позволяет принимать научно обоснованные решения для выбора безопасного способа проведения выработки.

На основании результатов этой работы прослежена динамика изменения напряженно-деформированного состояния горного массива при буровзрывной проходке выработки вблизи выбросоопасного угольного пласта, получены картины распространения волновых фронтов вдоль определяющих процесс направлений, зафиксирована история изменения параметров в характерной точке в окрестности наиболее вероятного возникновения внезапного выброса и при-

ведены хронограммы эволюции явления выброса. Основываясь на результатах расчетов для выбранной схемы проведения выработки можно выявить момент и место зарождения выброса и оценить последствия заполнения пространства выработки выбрасываемыми осколками и частицами разрушенной угленосной массы. Вопреки ожиданиям, результаты расчетов не достаточно четко показали границы, образовавшейся после выброса полости в горном массиве. Показано, что при внезапных выбросах происходит взрывоподобное газовыделение с выбросом в выработку смеси газов и измельченного угля, после которого в массиве остаются характерные полости. Выброшенные метан и уголь распространяются по горным выработкам, нарушают вентиляцию, разрушают крепь выработки и нередко являются причиной взрывов, обрушений пород и пожаров в шахтах.

Выполненные исследования показали, что использование предложенного подхода при моделировании поведения горного массива с выработкой открывает возможность адекватного описания внезапных выбросов и других процессов перехода вещества на новые энергетические уровни. Результаты исследования показывают достаточно широкие возможности выбранного метода исследования. Окончательным результатом работы было подтверждение целесообразности представления выбросоопасного угольного пласта посредством энергонасыщенного материала.

Постановка проблемы. Решение проблемы выбросов является одной из актуальных задач геотехнической механики. В этой связи представляет интерес решение модельной задачи о взрывании шпуровых зарядов ВВ в горном массиве в забое выработки, проводимой вблизи выбросоопасного угольного пласта. Физическая постановка задачи формулируется следующим образом (рис. 1).



а - горная порода; б - угольный пласт; с – заряды ВВ; d, e, f – поверхности, нагруженные горным давлением; h - свободная поверхность – забой выработки; i – кровля выработки; А – линия перпендикулярная шпурам с зарядами ВВ; В – линия вдоль угольного пласта; С – ожидаемая точка начала проявления выброса

Рисунок 1 – Исходная конфигурация задачи и схема расположения характерных линий, вдоль которых проводится анализ динамики напряжений и деформаций в массиве

В забое выработки размещены шесть пробуренных 2-х метровых шпуров Ø 45 мм, в которых размещены заряды типового ВВ с промежутком 0,5 м друг от друга. Заряды ВВ, жестко загерметизированны специальной забойкой и размещены на расстоянии 1 м от передней стенки забоя. Детонация зарядов выполняется одновременно. На расстоянии 0,2 м вглубь массива от кровли выработки расположен выбросоопасный угольный пласт мощностью 1 м, который моделируется слоем, который авторы представляют некоторым энергонасыщенным материалом. Задача в данной статье рассматривается в плоской постановке.

Метод решения. Для решения задачи и получения общих закономерностей и особенностей формирования выброса, по нашему мнению, в задаче целесообразно использовать модель сжимаемого идеального упругопластического тела механики сплошной среды [14, 15], которая при необходимости трансформируется в модель идеальной или вязкой сжимаемой жидкости, в модель пористой среды, в модель сыпучих материалов. Во взрывных задачах, ввиду превышения в порядки раз значений характерных параметров процесса, не учитывается влияние силы тяжести и атмосферного давления, т.е. все компоненты тензора напряжений внутри ненагруженных материалов (области a и b на рис.1) равны нулю, а на свободных поверхностях (h на рис.1) отсутствуют нормальные напряжения. Основная система уравнений механики сплошной среды, включающая законы сохранения массы, импульса и энергии имеет вид:

$$\frac{\dot{V}}{V} - U_{i,i} = 0; \quad \rho \dot{U}_i = \sigma_{ij,j}; \quad \frac{1}{V} \dot{E} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

Тензор напряжения может быть записан как

$$\sigma_{ij} = -P \delta_{ij} + S_{ij}, \quad (2)$$

где P - давление, δ_{ij} - дельта функция Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i=j$, иначе $\delta_{ij} = 0$), S_{ij} - девиатор тензора напряжения.

Система (1) замыкается уравнением состояния для определения давления

$$P = K(\rho_0 / \rho - 1), \quad (3)$$

где K – модуль объемного сжатия, и определяющими соотношениями для девиатора S_{ij} (закон Гука):

$$\dot{\tilde{S}}_{ij} + \lambda S_{ij} = 2\mu \left(\dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \dot{\epsilon}_{kk} \right). \quad (4)$$

Дифференцирование по времени в (4) компонентов девиатора тензора напряжений проводится в смысле Яумана [14].

$$\tilde{S}_{ij} = \dot{S}_{ij} - S_{ik} \omega_{jk} - S_{jk} \omega_{ik}, \quad (5)$$

где $\omega_{ij} = 1/2 (U_{i,j} - U_{j,i})$ – мощность энергии формоизменения; λ и μ – коэффициенты Ляме; точка над символом означает материальную производную по времени. Величина \tilde{S}_{ij} вводится для того, чтобы обеспечить нулевую скорость изменения напряжённого состояния среды при вращении её отдельных элементов как жёсткого целого.

Множитель λ положителен при пластических деформациях сдвига и тождественно равен нулю при упругом сдвиге. При $\lambda=0$ получаются уравнения Гука в дифференциальной форме. Параметр λ можно определить, используя условие пластичности

$$\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{3} Y_0, \quad (6)$$

где Y_0 – предел текучести.

Для замкнутой системы уравнений (1) - (6) ставится краевая задача с начальными и граничными условиями, состоящими в том, что на свободных поверхностях (h на рис.1) области расчета полагается равенство нулю вектора напряжений. На поверхностях d, e, f, g (рис.1) задается горное давление $P_0=5$ МПа (~ 50 атм). На кровле i (рис.1) задается условие неподвижности в вертикальном направлении $v_0=0$.

Требуется определить компоненты тензора напряжений σ_x, σ_y и S_{xy} во всех точках исследуемого массива и компоненты упругих перемещений u_x и u_y произвольной точки. Для решения поставленной краевой задачи применяется метод сглаженных частиц (SPH) [14], хорошо зарекомендовавший себя при решении многих задач геотехнической механики. Метод SPH – лагранжевый метод, в котором материал разбивается на частицы, для каждой из которых в любой момент времени известны масса, плотность, положение, скорость и напряжения. При этом интегрирование уравнений для i -й частицы производится по следующей схеме

$$\begin{aligned} x_i^{n+1} &= x_i^n + \Delta t \left(u_i^n + \frac{1}{2} \Delta t \frac{du_i^n}{dt} \right); \quad \rho_i^{n+1} = \rho_i^n + \Delta t \frac{d\rho_i^n}{dt}; \\ u_i^{n+1} &= u_i^n + \Delta t \frac{du_i^n}{dt}; \quad S_i^{n+1} = S_i^n + \Delta t \frac{dS_i^n}{dt}, \end{aligned} \quad (6)$$

где x_i - вектор столбец декартовых координат; u_i - вектор –столбец скоростей; S_i - компоненты деватора тензора напряжений; ρ - плотность; Δt - шаг по времени.

Значения компонентов тензора напряжений σ_i^{n+1} вычисляется с помощью уравнения состояния (3) по вычисленным значениям плотности ρ_i^{n+1} и деватора S_i^{n+1} .

Результаты расчетов. Описание результатов. На рисунке 2 показан ха-

рактр детонации зарядов, развитие ударной волны от взрывания шести зарядов ВВ в горном массиве, достижения ею пласта и начала активации ею процессов в выбросоопасном угольном пласте.

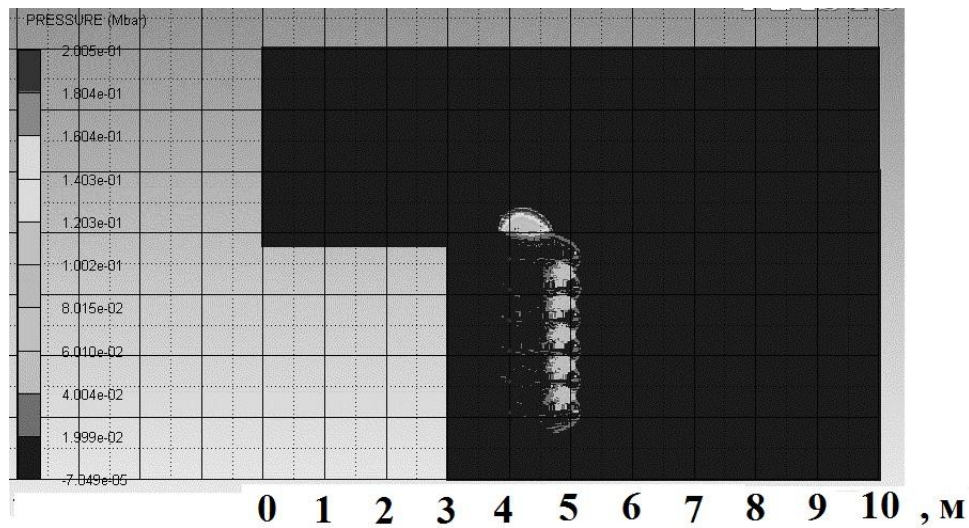


Рисунок 2 - Характер процесса детонации зарядов ВВ в массиве и активация ударной волной выбросоопасного пласта

К моменту времени порядка 100 мкс (рис. 2) волны нагружения от группы взорванных в шпурах зарядов ВВ достигают угольный пласт (рис. 3) и происходит его активация.

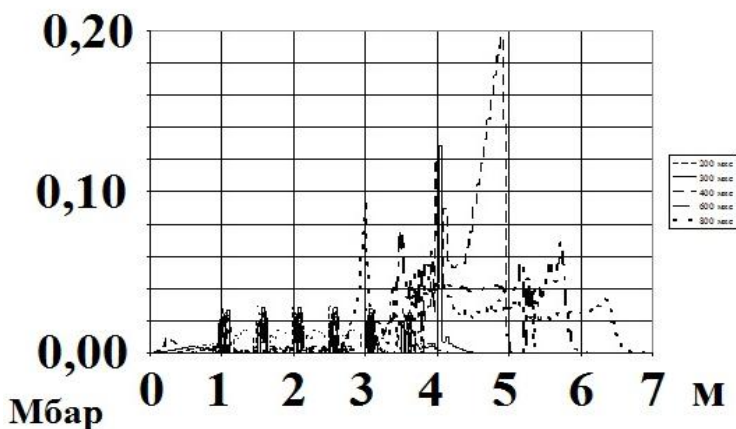


Рисунок 3 - Распределение значений динамического давления вдоль линии А, проведенной перпендикулярно зарядам через их середины

Анализ результатов моделирования показал, что быстрый ввод энергии подрыва зарядов позволяет сформировать в прямой волне наряду с областью пластического деформирования материала область растягивающих тангенциальных напряжений. Размеры области растягивающих напряжений по мере распространения волны увеличивается. Области растягивающих напряжений, превышающих предел прочности материала на разрыв, охватывают все большую

Рисунок 4 показывает картину трещинообразования в массиве горной породы. Развитие трещин под действием подрыва зарядов приводит к высвобождению химически активного компонента энергонасыщенной среды, которой представляется выбросоопасный угольный пласт.

Волна активации распространяется вдоль пласта.

Идущие вслед за ней волны разгрузки, вызывают разрыхление материала.

часть массива. В результате в этих областях реализуются наиболее благоприятные условия для образования трещин. В сечениях разграничивающих перемещаемую часть и неподвижный массив, возникают деформации сдвига. При достижении ими критических значений в этих сечениях также возникают трещины, и происходит вынос части материала, в направлении свободной поверхности.

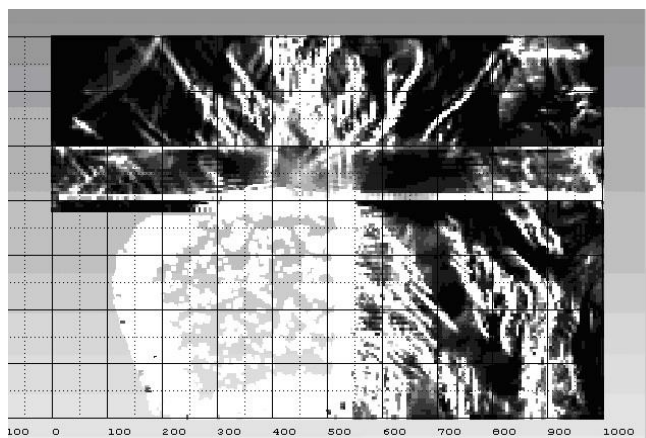


Рисунок 4 - Процесс трещинообразования в углеродном массиве в окрестности взрыва зарядов ВВ в призабойной части выработки, $t = 12$ мс

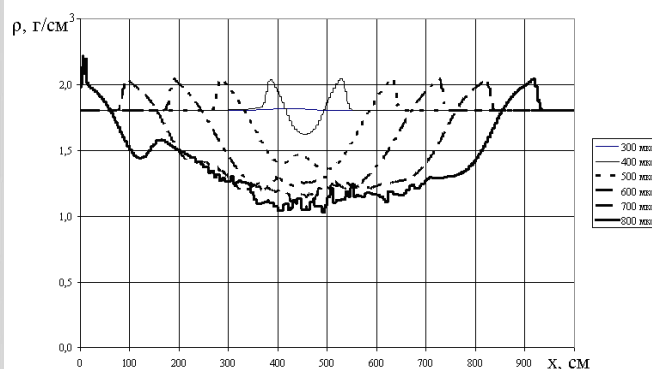


Рисунок 5 - Распространение волны давления после активации пласта вдоль линии, проходящей вдоль линии В (см. рис. 1) - середины пласта

Разрушение реализуется за счет деформаций сжатия и сдвига, вызванных наибольшими касательными напряжениями в волне. Роль отраженных волн в данном случае второстепенна. Происходящее прорастание пор и трещин, заполненных газом, создает выбросоопасные ситуации в угольном пласте. Рост трещин происходит в момент разгрузки напряженного состояния в окрестности забоя. При этом возникают волны дробления и волны выброса, что приводит к тому, что активированный энергонасыщенный пласт прорывает породную пробку и разрушенная углеродная масса вырывается скоростным потоком в полость выработки (рис. 6). При этом скорости разлета достигают сотен метров в секунду.

Отслеживание истории изменения параметров в характерных местах, в частности в точке С (рис. 1) в окрестности наиболее вероятного прорыва пробки вблизи выбросоопасного пласта позволяет предсказать момент начала выброса для рассматриваемой схемы выработки, проводимой буровзрывным методом.

На рисунке 7 показано изменение во времени массовой скорости точки С. Видно, что при взрывных работах вблизи выбросоопасного пласта, в отличие от случая проведения выработки вблизи невыбросоопасного пласта, в нашем случае после 300 мкс наблюдается безвозвратное движение материала вниз, что является явным признаком начала прорыва пробки.

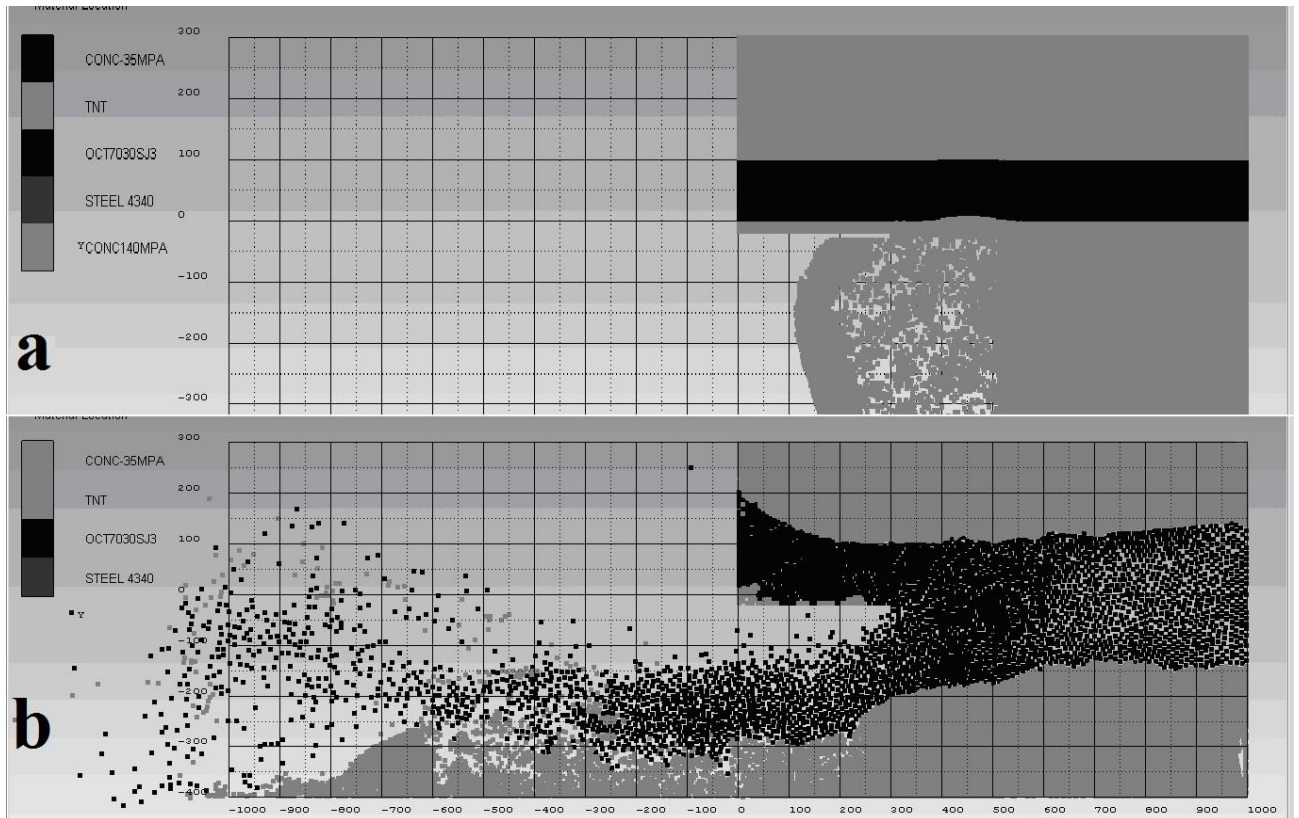


Рисунок 6 - Модельный расчет внезапного выброса в углепородном массиве (b), $t = 12$ мс. (a) – расчетная картина в тот же момент времени при наличии невыбросоопасного угольного пласта

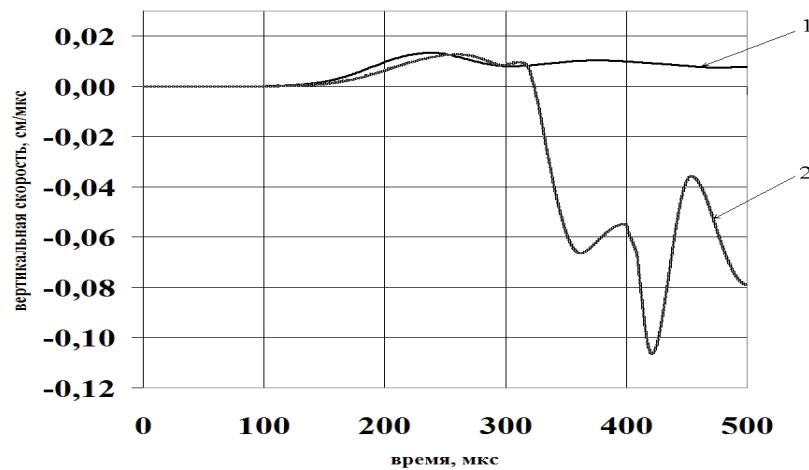


Рисунок 7 - История изменения скорости частиц горного материала- точки пересечения линии, проходящей через середины зарядов с линией нижней границы пласта – место наиболее вероятного прорыва пробки при невыбросоопасном (1) и выбросоопасном (2) состоянии массива (точка С на рис. 1). После 300 мкс начинается прорыв пробки – движение материала вниз

На рисунке 8 представлены результаты расчета состояния массива горной породы в различные моменты времени (кинограммы).

Время, мс	Давление	Состояние материала	Распределение материала
0,20			
0,30			
0,45			
0,75			
1,05			
1,35			

Рисунок 8 - Кинограммы зарождения выброса из выбросоопасного угольного пласта, расположенного вблизи проводимой выработки (упругое –серый, пластическое - черный)

Время, мс	Давление	Состояние материала (упругое – серый, пластическое - черный)
2,3		
4,7		
7,2		
9,7		
12,0		

Рисунок 9 - Фрагмент кинограммы реализации выброса разрушенной углеродной массы в пространство выработки

Рисунок 9 показывает процесс выброса частиц материала углепородного массива в полость выработки.

Выводы и перспективы развития направления исследований. Организована управляющая среда для формирования компьютерных моделей выбросоопасных явлений, их расчета и постпроцессинга, а также изменения или целенаправленного варьирования этих моделей в процессе многовариантных исследований с целью обоснования рациональных вариантов ведения выработки. Предложен инструмент анализа состояния угленасыщенного массива горной породы вблизи выработки, который, в отличие от ранее разработанных, рассматривает весь цикл выброса от подрыва зарядов до разлета угля и породы в полость выработки

Отмеченные обстоятельства позволяют заключить, что на основе новых авторских подходов реализован эффективный специализированный программно-модельный комплекс для изучения выбросоопасных явлений. Это дает возможность перейти в последующих исследованиях к решению конкретных практических задач.

Полученная расчетная информация особенно необходима для построения адекватных инженерных моделей, описывающих условия, при которых возможна реализация условий образования выбросов. Разработана методология качественного определения характеристик фрагментации горной породы естественного и заданного дробления с использованием расчетных данных. При этом континуальная стадия расчета заканчивается процедурой построения законов распределения масс разрушаемого массива, как сплошной субстанции, и ее начальных скоростей по зонам разлета. На следующем этапе по полученному распределению скоростей ставится в соответствие осколочный поток породной массы. При этом возможен подбор аналитического закона распределения реальному разлету осколков породы и угля, применяя критерий согласия Пирсона. Наконец, на заключительном этапе полученному распределению осколочного поля возможно установить в соответствие годограф скоростей и произвести оценку формы макроосколков.

Таким образом, предложена методика расчетного определения параметров взрывных полей, формируемых зарядами ВВ, основанная на численном решении упругопластических задач механики сплошной среды в двумерной постановке. При этом к определяемым в дальнейшем с достаточной для практики точностью характеристикам можно отнести геометрические, массовые и кинематические параметры осколочных макетов движения разрушенной углепородной массы – временные распределения масс и скоростей осколков для зарядов ВВ – характер затухания ударных волн в окружающей среде. Продемонстрированы возможности расчетной методики для моделирования быстропротекающих процессов. Представлены наиболее интересные, с нашей точки зрения, результаты, полученные с использованием реализованной методики.

Полученные результаты могут быть применены к изучению явлений выброса. Дальнейшие исследования необходимы, чтобы перейти от качественных результатов к получению количественных характеристик для различных вариан-

тов параметров схем проведения выработок, систематизированная обработка которых позволит получить основные положения инженерных методик.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. О развитии новой методологии классифицирования газодинамических явлений в угольных шахтах / А.Ф. Булат, С.П. Минеев, А.М. Брюханов [и др.] // ФТПРПИ. - 2013. - №6. - С. 60- 70.
2. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ: СОУ 10.1.00174088.011. – [Дійсн. від 30.12.2005] / А.Ф. Булат, С.П. Мінеєв [та ін.]. - – Офіц. вид. - Київ: Мінвуглепром України, 2005.- 225 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України. Стандарт).
3. Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных угольных пластах / С.П. Минеев, А.А. Рубинский, О.В. Витушко [и др.]. - Донецк: Східний видавничий дім, 2010. - 604 с.
4. Христианович, С.А. Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса / С.А. Христианович, Р.Л. Салганик. - М., 1980. - 44 с. - (Препринт / Акад. наук СССР, Ин-т проблем механики; N 152). - Библиогр.: с.33-34.
5. Ходот, В.В. Внезапные выбросы угля, породы и газа / В.В. Ходот. - М.: Госгортехиздат, 1961.- 363 с.
6. Петросян, А.Э. Теория внезапных выбросов / А.Э. Петросян, Б.М. Иванов, В.Г. Крупеня. - М.: Наука, 1983.- 150 с.
7. Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. – М.: Недра, 1978.- 162 с.
8. Минеев, С.П. Активация десорбции метана в угольных пластах / С.П. Минеев, А.А. Прусова, М.Г. Корнилов. – Днепропетровск: Вебер, 2007.- 252 с.
9. Алексеев, А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – К.: Наукова думка, 2010.- 452 с.
10. Подильчук, Ю.Н. Пространственные задачи горных пород / Ю.Н. Подильчук.- К.: Наукова думка, 1983.- 158 с.
11. Минеев, С.П. Математическое описание деформирования углепородного массива как трехфазной среды при гармоническом воздействии / С.П. Минеев, А.А. Прусова, В.В. Лях // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / ІТМ НАН України. - Дніпропетровськ, 2000.- Вип.13.- С. 47-54.
12. Зорин, А.Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых / А.Н. Зорин, Ю.М. Халимендик, В.Г. Колесников. – М.: Недра, 2001. - 413 с.
13. Физико–химия газодинамических явлений в шахтах / В.В. Ходот, М.Ф. Яновская, Ю.С. Премыслер [и др.]. – М.: Наука, 1973. –140 с.
14. Физика взрыва: В 2 т. / С.Г.Андреев [и др.]; Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. Т.2. - 656 с.
15. Шиповский, И.Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода / И.Е. Шиповский // Науковий вісник НГУ / НГУ. - Дніпропетровськ, 2015. – № 1. - С. 76 – 82.
16. Минеев, С.П. Свойства газонасыщенного угля / С.П. Минеев. - Днепропетровск: НГУ, 2009.- 220 с.
17. Минеев, С.П. Проведение выработок проходческими комбайнами по выбросоопасным угольным пластам и породам / С.П. Минеев, А.А. Рубинский. - Днепропетровск: Дніпро, 2006.- 384 с.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Mineev, S.P., Bryukhanov, A.M. and Nikiforov, A.V. (2013), “Development of classification procedure for gas-dynamic events in coal mines”, *Journal of Mining Science*, no. 6, pp. 60-70.
2. Ukraine Ministry of Coal Industry (2005), 10.1.001740088-2005. *Pravila vedeniya gornykh robot na plastakh, sklonnykh k gazodinamicheskim yavleniyam: Normativnyu document Minuglepromu Ukrainy. Standart* [10.1.001740088-2005 Mining rule in seams prone to gas-dynamic phenomena: Regulatory Document Coal Industry of Ukraine. Standard], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev, Ukraine.
3. Mineev, S.P., Rubinkiy, A.A., Vitushko, O.V. and Radchenko, A.G. (2010), *Gornye raboty v slozhnykh usloviyakh na vybrosoopasnykh ugolnykh plastakh* [Mining works in difficult terms on the outburst-prone coal beds], Shidnyi vydavnychiy dim, Donetsk, Ukraine.
4. Khristianovich, S.A. and Salganik, R.L. (1980), *Vybrosopasnye situatsii. Droblenie. Volna vybrosa* [Outburst situation. Crushing. The wave of emission], Preprint, no.152, Institute of Problems of Mechanics, The Academy of Sciences of the USSR, Moscow, Russia.
5. Khodot, V.V. (1961), *Vnezapnye vybrosy uglya, porody i gaza* [The sudden emissions of coal, rock and gas], Gosgortekhzdat, Moscow, Russia.

6. Petrosyan, A.E., Ivanov, B.M. and Krupenya, V.G. (1983), *Teoriya vnezapnykh vybrosov* [The theory of sudden emissions], Nauka, Moscow, Russia.
7. *Osnovy teorii vnezapnykh vybrosov uglya, porody i gaza* [Foundations of the theory of sudden emissions of coal, rock and gas] (1978), Nedra, Moscow, Russia.
8. Mineev, S.P., Prusova, A.A. and Kornilov, M.G. (2007), *Aktivatsiya desorptsii v ugolnykh plastakh* [The activation of desorption methane in coal layers], Veber, Dnepropetrovsk, Ukraine.
9. Alekseev, A.D. (2010), *Fizika uglya i gornykh protsessov* [Physics of the coal and mining processes], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
10. Podilchuk, Iu.N. (1983), *Prostranstvennye zadachi gornykh porod* [Spatial problems of rocks], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
11. Mineev, S.P., Prusova, A.A. and Lyakh, V.V. (2000), "The mathematical description of deformation of coal rock mass as a trefaznoy medium at harmonic influence", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 13, pp. 47-54.
12. Zorin, A.N., Khalimendik, Iu.M. and Kolesnikov, V.G. (2001), *Mekhanika razrusheniya gornogo massiva i ispolzovanie ego energii pri dobyche poleznykh iscopaemykh* [Fracture mechanics of the rock mass and its energy use in mining], Nedra, Moscow, Russia.
13. Khodot, V.V., Yanovskaya, M.F., Premysler, Iu.S. and others (1973), *Fiziko-khimiya gazodinamicheskikh yavleniy v shakhtakh* [Physic and chemistry of gas-dynamic effects in mines], Nauka, Moscow, Russia.
14. Orlenko, L.P. (ed) (2004), *Fizika vzryva* [Explosion Phisik], 3rd ed., FIZMATLIT, Moscow, Russia.
15. Shipovskii, I. Ye. (2015), "Simulation for fracture by smooth particle hydrodynamics code", *Naukovyi visnyk Natsionalnogo girnychogo universytetu*, no.1, pp. 76-82.
16. Mineev, S.P. (2009), *Svoystva gazonasyshchenogo uglya* [The properties of gassy coal], NMU, Dnepropetrovsk, Ukraine.
17. Mineev, S.P. and Rubinkiy, A.A. (2006), *Provedenie vyrabotok prokhodcheskimi kombaynami po vybrosoopasnym plastam i porodam* [Roadheaders of the workings of outburst coal seams and rocks], Dnipro, Dnepropetrovsk, Ukraine.

Об авторах

Минеев Сергей Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, sergmineeov@gmail.com.

Шиповский Иван Евгеньевич, кандидат технических наук, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, sergmineeov@gmail.com.

Киселев Владимир Васильевич, инженер, Государственное предприятие «Угольная компания «Краснолиманская», г. Родинское, Красноармейский район, Донецкая область, Украина, sergmineeov@gmail.com.

Гулай Алексей Александрович, заместитель главного инженера, ПАО «Шахтоуправление «Покровское», г. Красноармейск, Донецкая область, Украина, sergmineeov@gmail.com.

About the authors

Mineev Sergey Pavlovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, sergmineeov@gmail.com.

Shipovskii Ivan Evgenyevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, sergmineeov@gmail.com.

Kiselev Vladimir Vasilevich, Engineer, State enterprise «Mining Company «Krasnolimanskaya» Rodinsky, Krasnoarmeysk district, Donetsk region, Ukraine, sergmineeov@gmail.com.

Gulay Aleksey Aleksandrovich, Deputy Chief Engineer, «Colliery Group «Pokrovskoye», Krasnoarmeysk, Donetsk region, Ukraine, sergmineeov@gmail.com.

Анотація. Розглянуто працездатність методу згладжених часток (SPH) для розрахунку напружено - деформованого стану (ПДВ) вуглевмісного масиву гірської породи з урахуван-

ням можливості виникнення викиду. Основним завданням було отримання якісних результатів наслідків проведення виробок вибуховим методом в гірському масиві поблизу викидонебезпечного вугільного пласта.

Дослідження показало, що використання запропонованого підходу при моделюванні поведінки гірського масиву з порожниною відкриває можливість адекватного опису раптових викидів. Підтверджено доцільність представлення викидонебезпечного вугільного пласта за допомогою енергонасиченого середовища. Грунтуючись на результатах розрахунків для вибраної схеми проведення буропідричних виробок можна виявити момент і місце зародження викиду і оцінити наслідки заповнення простору виробки осколками гірського масиву, що викидаються. Отримані результати можуть бути застосовані до вивчення явищ викиду. Подальші дослідження потрібні, щоб перейти від якісних результатів до отримання кількісних характеристик для різних варіантів параметрів схем проведення виробок, систематизована обробка яких дозволить одержати основні положення інженерних методик.

Ключові слова: викид, вуглепорідний масив гірська виробка, SPH - метод моделювання.

Abstract. The authors considered performance of the smoothed particle hydrodynamics (the SPH method) applied for calculating a stress - strain state (SSS) of the coal-rock massif with taking into account a possibility of the outburst occurrence. A basic task of the study was to obtain high-quality results on aftereffects of the roadway mining by a blasting method in the rocks near-by with the outburst-prone coal bed.

The research showed that the proposed method used for modeling the rock behaviour in the process of mining operations made it possible to describe adequately the sudden outbursts. Reasonability to present an outburst-prone coal bed in the form of a saturated-by-energy medium was confirmed. Basing on the calculations made for the proposed scheme of the rock mining by the blasting method it became possible to determine a moment and a point of the outburst occurrence and to estimate aftereffects of the roadway space filling with the rock fragments.

The findings can be applied in further studies of the outburst process which are necessary in order to transfer from qualitative results to quantitative results with testing various variants of the mining parameters, and, with the systemized processing of the data, to create new engineering methods.

Keywords: outburst, coal-rock massif, smoothed particle hydrodynamics (SPH) method for simulation.

Стаття поступила в редакцію 22.07.2015.

Рекомендовано к печати д-ром геол. наук Л.И. Пимоненко