

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАССИВА ПРИ ВЗРЫВНОМ ПРОВЕДЕНИИ ВЫРАБОТКИ ВБЛИЗИ ВЫБРОСООПАСНОГО ПЛАСТА**

*С.П. Минеев, Институт геотехнической механики НАН Украины, Украина  
И.Е. Шиповский, Научно-исследовательский центр, Россия*

Приведены качественные результаты оценки проведения выработки буровзрывным способом в горном массиве вблизи выбросоопасного угольного пласта. Для расчета напряженно - деформированного состояния углепородного массива с учетом возможности возникновения выброса использован метод сглаженных частиц (SPH). Полученные результаты могут быть применены к дальнейшему изучению явления выброса угля и газа. Дальнейшие исследования будут необходимы, чтобы перейти от качественных результатов к получению количественных характеристик для различных схем ведения горных работ.

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, что 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 мат.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. Поэтому целью данной работы является 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 энергонасыщенным материалом.

В данной работе 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 была выполнена путем компьютерного моделирования поставленной краевой задачи, анализа полученного НДС горного массива и волновой картины в породе и 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.

Решение задачи о взрывании шпуровых зарядов ВВ в горном массиве в забое выработки, проводимой вблизи выбросоопасного угольного пласта осуществлялось следующим образом. Физическая постановка задачи формулируется следующим образом (рис. 1). В забое выработки размещены шесть пробуренных 2-х метровых шпуров  $\varnothing 45$  мм, в которых размещены заряды типового ВВ с промежутком 0,5 м друг от друга. Заряды ВВ, жестко загерметизированы в шпуре 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 мы представляем некоторым энергонасыщенным материалом. Задача в данной статье рассматривается в плоской постановке.

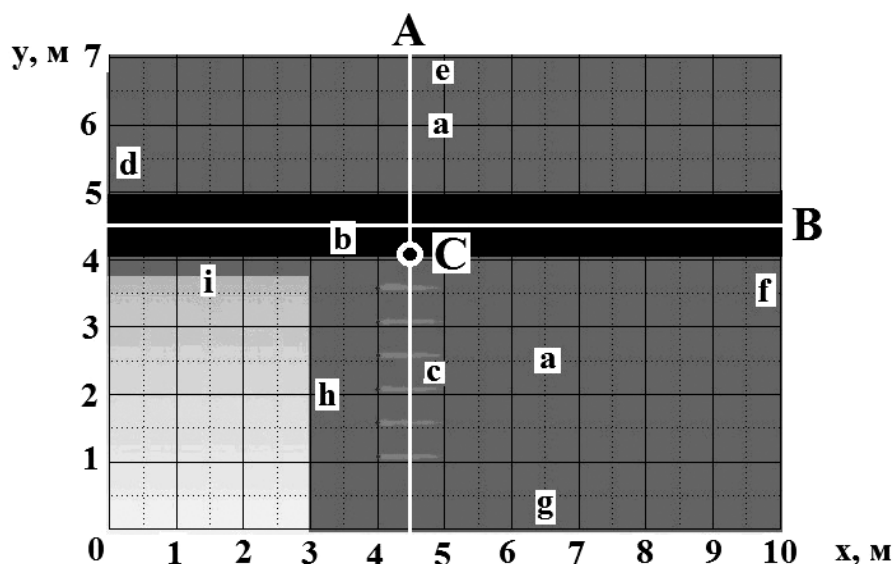


Рис. 1. Исходная конфигурация задачи и схема расположения характерных линий, вдоль которых проводится анализ динамики напряжений и деформаций в массиве: а - горная порода; б - угольный пласт; с – заряды ВВ; d, e, f – поверхности, нагруженные горным давлением; h - свободная поверхность – забой выработки; i – кровля выработки; А – линия перпендикулярная шпурам с зарядами ВВ; В – линия вдоль угольного пласта; С – ожидаемая точка начала проявления выброса

Для решения задачи и получения общих закономерностей и особенностей формирования выброса, по нашему мнению, в задаче была использована 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 а и б 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,  $\delta_{ij}$  - 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].

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

где  $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(U_{i,j} - U_{j,i})$  – мощность энергии формоизменения;  $\lambda$  и  $\mu$  – коэффициенты

Ляме; точка над символом означает материальную производную по времени. Величина  $\dot{\tilde{S}}_{ij}$  вводится для того, чтобы обеспечить нулевую скорость изменения напряжённого состояния среды при вращении её отдельных элементов как жёсткого целого.

Множитель  $\lambda$  положителен при пластических деформациях сдвига и тождественно равен нулю при упругом сдвиге. При  $\lambda = 0$  получаются уравнения Гука в дифференциальной форме. Параметр  $\lambda$  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 ( $\sim 50$  атм). На кровле  $i$  (рис.1) задается условие неподвижности в вертикальном направлении  $v_0 = 0$ .

Требуется определить компоненты тензора напряжений  $\sigma_x, \sigma_y$  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:

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

где:  $\mathbf{x}_i$  - вектор столбец декартовых координат;  $\mathbf{u}_i$  - вектор – столбец скоростей;  $S_i$  - компоненты девиатора тензора напряжений;  $\rho$  - плотность;  $\Delta t$  - шаг по времени.

Значения компонентов тензора напряжений  $\sigma_i^{n+1}$  вычисляется с помощью уравнения состояния (3) по вычисленным значениям плотности  $\rho_i^{n+1}$  и девиатора  $S_i^{n+1}$ .

Рассмотрим ниже основные результаты расчета. На рисунке 2 показан характер детонации зарядов ВВ в горном массиве достижения ею пласта и начала активации ею процессов в выбросоопасном угольном пласте.

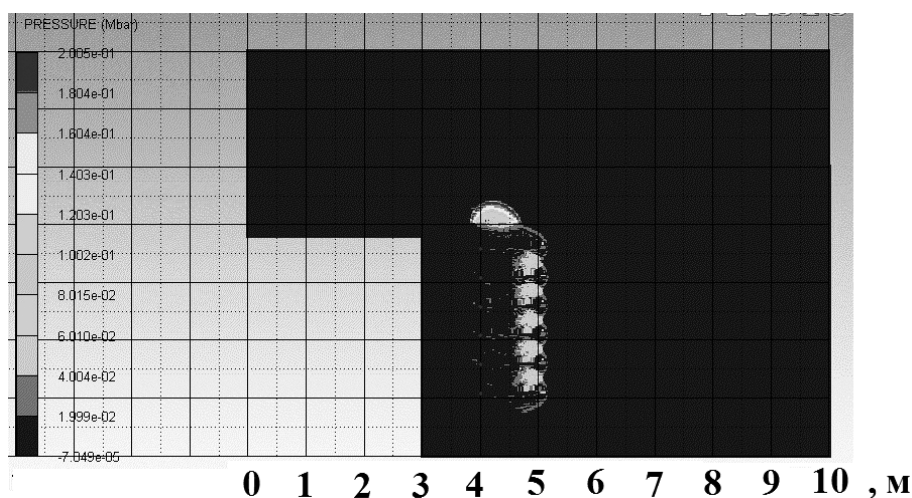


Рис. 2. Характер процесса детонации зарядов ВВ в массиве и активация ударной волной выбросоопасного пласта

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.

На рис. 4 показана картина трещинообразования в горном массиве. Развитие трещин под действием взрывания зарядов приводит к высвобождению химически активного компонента энергонасыщенной среды, которой представляется выбросоопасный угольный пласт. При этом волна активации распространяется вдоль пласта. Идущие вслед за ней волны разгрузки, вызывают разрушение материала.

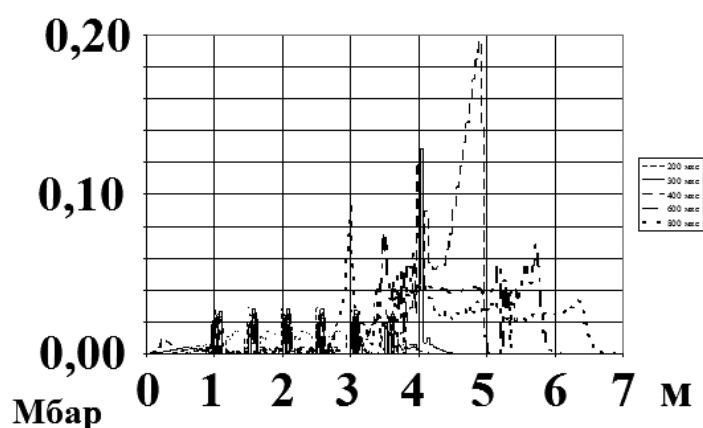


Рис. 3 Распределение значений динамического давления вдоль линии А, проведенной перпендикулярно зарядам через их середины

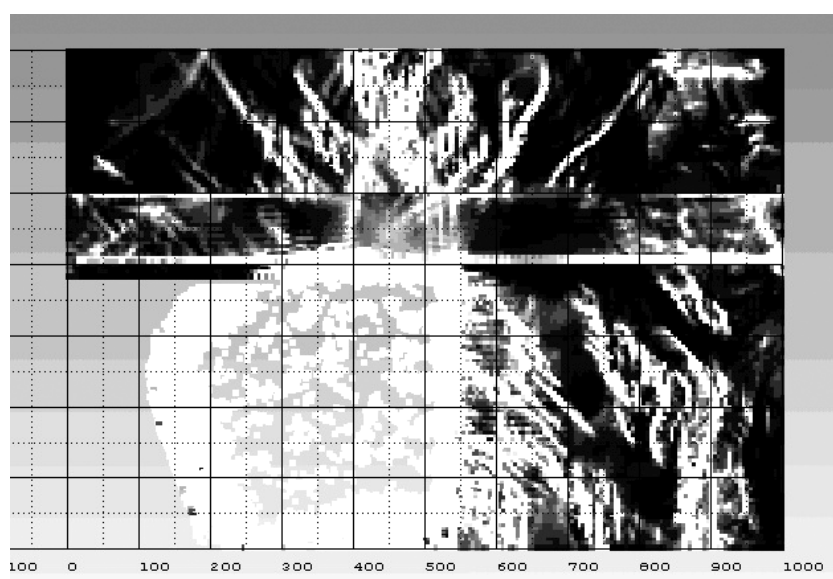


Рис. 4. Процесс трещинообразования в углеродном массиве в окрестности взрыва зарядов ВВ в призабойной части выработки,  $t = 12$  мс

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 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. Разрушение реализуется за счет деформаций сжатия и сдвига, вызванных наибольшими касательными напряжениями в волне. Роль отраженных волн в данном случае второстепенна. Происходящее прорастания 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 углепородная масса вырывается скоростным потоком в полость выработки (рис. 6). При этом скорости разлета достигают сотен метров в секунду.

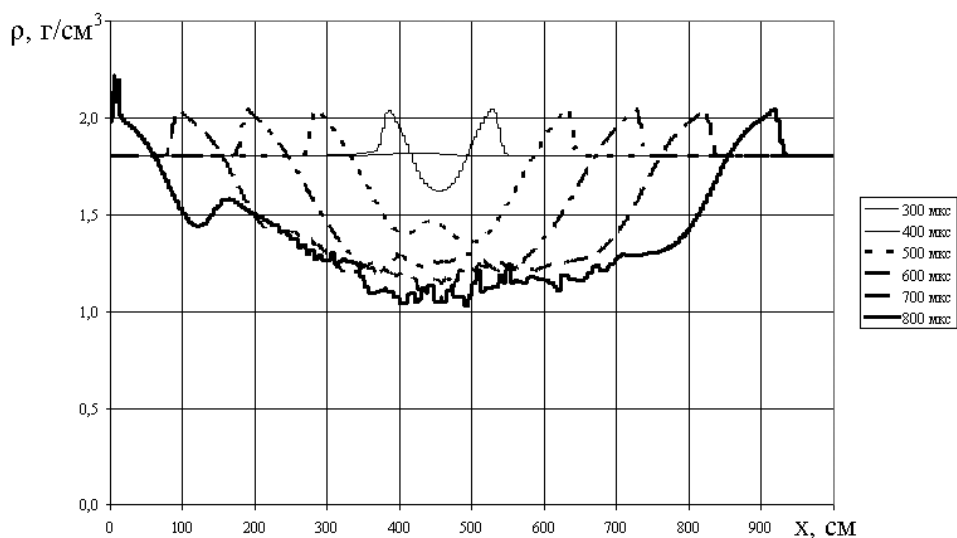


Рис. 5 Распространение волны давления после активации пласта вдоль линии, проходящей вдоль линии В (рис. 1) - середины пласта

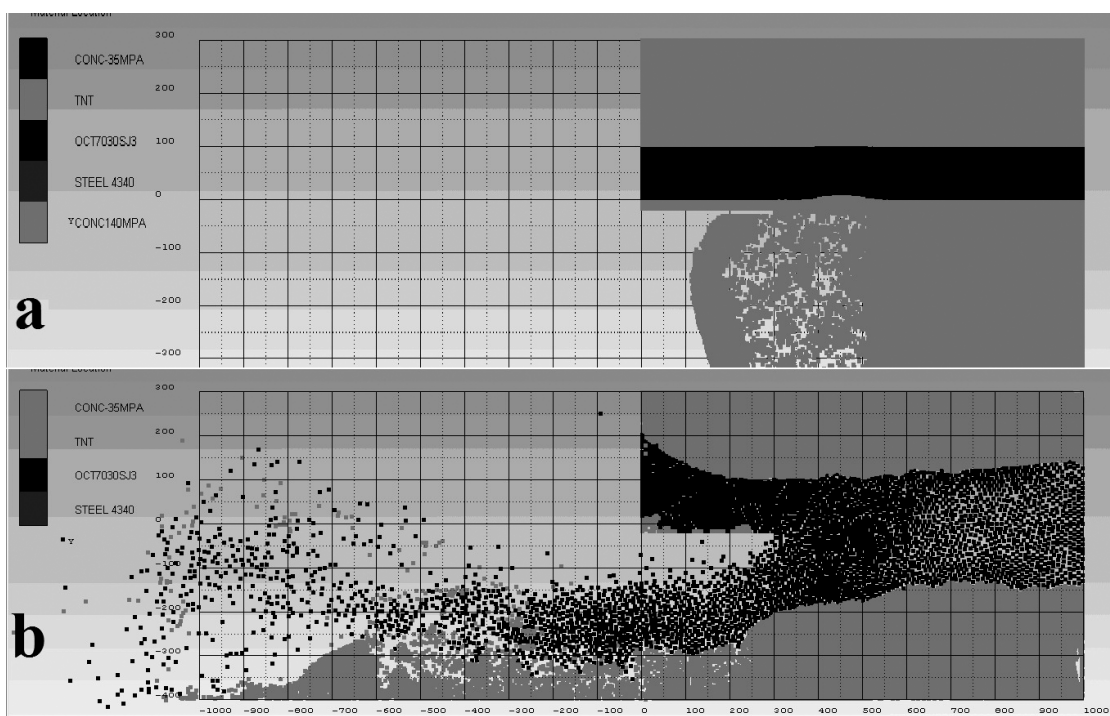


Рис. 6. Модельный расчет внезапного выброса в углепородном массиве (b),  $t = 12$  мс. (a) – расчетная картина в тот же момент времени при наличии невыбросоопасного угольного пласта

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

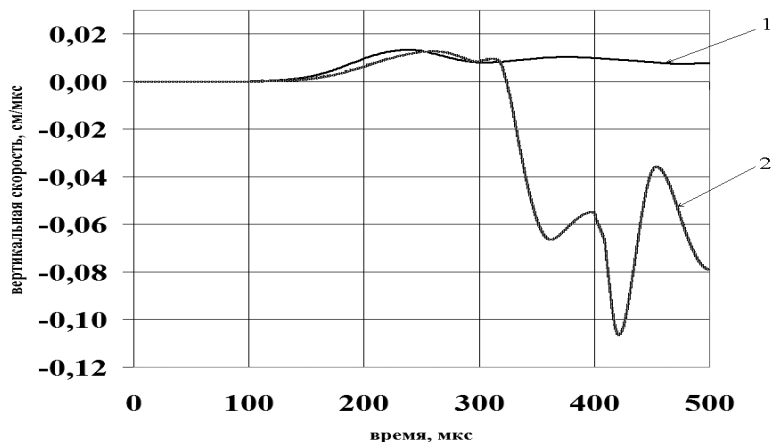


Рис. 7. История изменения скорости частиц горного массива в точке пересечения линии, проходящей через середину зарядов с линией нижней границы пласта (точка С на рис. 1) при его невыбросоопасном (1) и выбросоопасном (2) состоянии. После 300 мкс начинается прорыв пробки – движение материала вниз

Время, мс	Давление	Состояние материала (упругое – серый, пластическое - черный)	Распределение материала
0,20			
0,30			
0,45			
0,75			
1,05			
1,35			

Рис. 8. Кинограммы зарождения выброса из выбросоопасного угольного пласта, расположенного вблизи проводимой выработки

Рисунок 9 показывает процесс выброса частиц разрушенной углепородной массы в полость выработки.

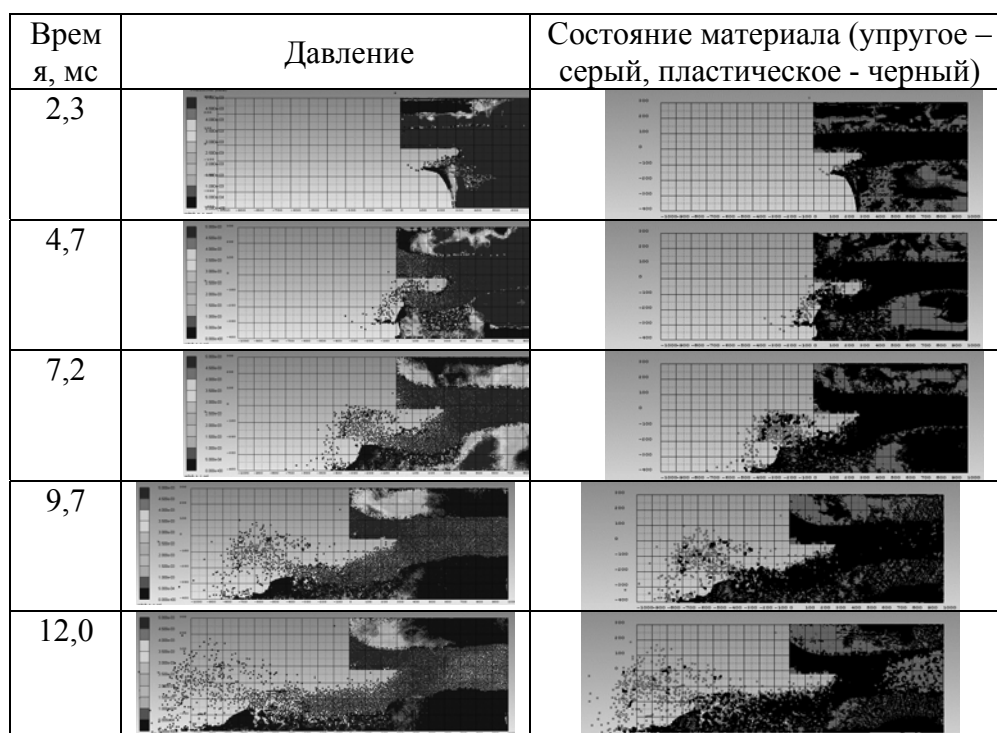


Рис. 9. Фрагмент кинограммы реализации выброса разрушенной углепородной массы в пространство выработки

Основные перспективы развития направления исследований заключаются в следующем. 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 углепородного массива.

Подводя итоги необходимо отметить, что исследования выполнялись в инициативном порядке. Полученные результаты прояснят 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 исследований состоит в том, что реализована впервые оригинальная вычислительная технология для решения рассматриваемого класса задач, обоснована и сформулирована модель пласта как некоторой энергонасыщенной среды. Получен ряд интересных научных результатов.

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.

В результате 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 приведены 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 углепородной 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.

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.

### **Выводы.**

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. Представлены наиболее интересные, с нашей точки зрения, результаты, полученные с использованием реализованной методики. Полученные результаты могут быть применены к изучению газодинамических явлений. Дальнейшие исследования необходимы для перехода от качественных результатов к получению количественных характеристик для различных схем проведения выработок, систематизация которых позволит получить основные положения инженерных методик.

### **Список литературы**

1. Булат, А.Ф. О развитии новой методологии классифицирования газодинамических явлений в угольных шахтах / А.Ф.Булат, С.П.Минеев, А.М.Брюханов, А.В.Никифоров.-

ФТПРПИ, 2013, №6. –С. 60- 70.

2. Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям: СОУ 10.1.00174088.011 - 2005.-Киев, 2005.- 225 с.

3. Минеев, С.П. Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных угольных пластах / С.П. Минеев, А.А. Рубинский, О.В. Витушко, А.Г. Радченко. - Донецк: Східний видавничий дім, 2010. - 604 с.

4. Христианович, С.А. Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса / С.А. Христианович, Р.Л. Солганик – М.: ИПМ АН СССР, 1980.- Препринт № 159.

5. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля, породы и газа.- 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.-

11. Минеев, С.П. Математическое описание деформирования углепородного массива как тrefазной среды при гармоническом воздействии // С.П.Минеев, А.А. Прусова, В.В. Лях. - Геотехнічна механіка: Міжвід. Зб. наук. праць /Ін-т Гетехнічної механіки НАН України.- Киев: Дніпропетровськ, 2000.- Вип.13.- С. 47-54.

12. Зорин, А.Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых / Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. – 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. - Днепропетровськ, 2014.

16. Минеев С.П. Свойства газонасыщенного угля. - Днепропетровск: НГУ, 2009.- 220 с.

17. Минеев, С.П. Проведение выработок проходческими комбайнами по выбросоопасным угольным пластам и породам / Минеев С.П., Рубинский А.А. - Днепропетровск: Дніпро, 2006.- 384 с.