

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024

№ 2

УДК 622.235 : 539.3

**ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕННОГО ВЗРЫВАНИЯ
НА ТЕХНОЛОГИЮ РАЗРАБОТКИ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ
МАССИВА НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ**

С. Д. Викторов, В. М. Закалинский, И. Е. Шиповский, Р. Я. Мингазов

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: victorov_s@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Рассмотрена прогнозная концепция научно обоснованного решения задач горного производства на больших глубинах. Исследуется возможность развития решений соответствующих проблем и их инструментарием. Рассмотрены конструкции скважинного заряда в форме пучка сближенных скважинных зарядов с эффектом направленного действия взрыва, который достигается варьированием в широких пределах конфигурацией пучкового заряда. Альтернативные технические возможности бурения скважинных зарядов позволяют одну и ту же эквивалентную энергию по-разному рассредоточить в одинарные заряды большого диаметра и пучковые уменьшенного. Механизм взрывного процесса пучкового заряда существенно расширяет диапазон его применения, используя новые подходы при решении проблем горного производства на разных глубинах. Некоторые технологические аспекты систем разработки в различных горных породах представлены результатами моделирования численным методом сглаженных частиц нового подхода к взрывному воздействию. Получены предварительные оценочные результаты исследований в данном направлении.

Взрыв, пучковые заряды, конструкция скважинного заряда, проблемы горного производства, компьютерное моделирование, механика сплошной среды, законы сохранения, направленное взрывание

DOI: 10.15372/FTPRPI20240212

EDN: GDOFUD

Разработка месторождений полезных ископаемых характеризуется нестабильностью компонентов ее систем, являющейся прямым следствием непрерывной изменчивости свойств и структур горно-геологических массивов горных пород. Нестабильность компонентов имеет различный временной характер — от текущего до долговременного состояния [1, 2]. Особый интерес представляет исследование процессов горного производства, носящих долговременный характер и переходящих в проблемы. Суть некоторых из них заключается в решении задач, связанных с определенным количеством взрывчатых веществ на каждом горном предприятии при массовой отбойке, одновременной защитой выработок от сейсмических воздействий, достижением необходимого гранулометрического состава, с внезапными выбросами угля и газа при добыче и необходимостью проходки специальных дорогостоящих выработок; достижением взрывного действия взрыва в определенных направлениях и др.

Для решения разнообразных непредвиденных ситуаций могут использоваться средства буровзрывных работ [3, 4]. Отметим, что массовое применение буровзрывных работ с целью достижения дробления горных пород и получения соответствующего гранулометрического состава в данном случае не учитывается. Проблема решалась с помощью расширенного действия идеи заряда особой конструкции. Это достигается путем замены обычной круглой в сечении формы одного скважинного заряда на несколько близкорасположенных и рассредоточенных в различных формах сближенных зарядов. При этом оба сравниваемых заряда по массе и энергии эквивалентны. Механизм взрывного процесса пучка сближенных скважинных зарядов существенно отличается от стандартной картины, что позволяет использовать их для разнообразных изысканий при решении различных проблем горного производства.

Выделим один важнейший аспект, присущий большинству подземных и открытых систем разработки рудных и угольных месторождений полезных ископаемых, — возможность изменения характера состояния массива горных пород до ведения горных работ. Механизм достижения предполагает различные формы и виды применения взрывного действия взрыва с целью его влияния на управление и изменение геомеханического состояния горного массива. Ведущее значение принадлежит направленному взрыванию, компоненты которого включают разработку соответствующего инструментария, с одной стороны, и изменение характера трещин и других особенностей горного массива под их воздействием — с другой. Техническая задача исследования предполагает достижение ориентированной массовой взрывной отбойки с конструктивными элементами направленного действия взрыва. При направленном взрывании в качестве предохранительных элементов рассмотрена защита расположенных в шахтном пространстве целиков, а также горнотехнических объектов от негативных последствий распространяющихся сейсмовзрывных волн при массовых взрывах. Последние характерны для карьеров при комбинированной разработке угольных и рудных месторождений полезных ископаемых.

Цель работы состояла в перенаправлении части разрушающего действия взрывной волны и снижении негативных последствий в горнотехнических условиях. Для этого использовалась модернизация пучкового скважинного заряда, который конструктивно разделен на две разновременно детонирующие части, каждая из которых представляла собой самостоятельный заряд. Один из них располагался в нижней части скважины. Он взрывался первым и предназначался для предварительного образования предохранительного участка подскважинной зоны разрушенной горной массы. Через инертный промежуток располагался верхний заряд взрывчатого вещества, инициированный другим детонатором во вторую очередь. Механизм действия взрыва такого заряда позволял изменять интенсивность сейсмовзрывной волны в разных направлениях, что использовано в задаче охранения шахтных объектов. Данный инструментарий, изменяющий интенсивность взрывной волны, ее направление с воздействием на состояние массива, — один из аспектов совершенствования горных технологий.

Направленность взрывного действия достигается изменением распределения энергии взрыва пучкового заряда. Посредством комплексного использования взрывчатых веществ и соответствующей конструкции заряда при взрыве формируется механизм направленного взрыва. Вначале бурят обычные, но сближенные скважинные заряды различной формы расположения. Последующая направленность взрывного воздействия достигается одновременным обеспечением максимальной продолжительности импульса взрыва за счет порядного короткозамедленного инициирования рядов пучковых зарядов. Последовательное нарастание энергии взрывной волны в сторону проблемной стороны горного массива достигается передачей электронным детонатором детонации очередного ряда каждой противоположной скважине с рассчитанным до нескольких миллисекунд временем. В сближенных пучковых зарядах с разновременным взрыванием их рядов используют взрывчатые составы с растянутым импульсом взрыва и уме-

ренным или низким начальным давлением. Они обычно представлены игданитом или разработанными на их основе разновидностями низко- и среднебизантийскими взрывчатыми веществами. Физика взрыва такого заряда характеризуется растянутым диапазоном контролируемого направленного импульса взрыва заряда. Это достигается конструктивными и структурными особенностями пучка инициирования сближенных рядов с применением взрывчатых составов соответствующего типа с максимальной продолжительностью действия импульса взрыва. При этом направление взрыва потока меняется в зависимости от характера и цели действия взрыва таким образом, чтобы выпуклости формы заряда обращались в сторону проблемного массива.

Компьютерное моделирование взрыва короткозамедленных рядов сближенных скважинных зарядов, в частности вогнутой или линейной формы, а также эквивалентного одинарного заряда подтвердило результаты действия данного взрывного процесса. Выявлена линейная зависимость между масштабом области изменения массива и энергией заряда нового способа его детонации. Управление такими зарядами различной конфигурации и видами взрывного воздействия показало их опережающую возможность на тектонические напряжения и динамические явления в массивах горных пород.

Известно влияние воздействия на состояние горного массива, которое в случае направленного действия взрыва имеет определенные особенности, например связанные с трещиноватостью. Так, при древесно-скважинном дренаже метана достигается его стимуляция влиянием на трещиноватость угольных пластов. Многочисленные примеры разнообразных воздействий на параметры состояния рудного массива в различных условиях и глубинах подтверждают данную возможность [5–8]. В целом, с учетом взрывного воздействия на геологические аномалии могут быть изменены и уточнены (даже на стадии проектирования) конструктивные элементы систем и технологий разработки месторождений разных полезных ископаемых (рис. 1).

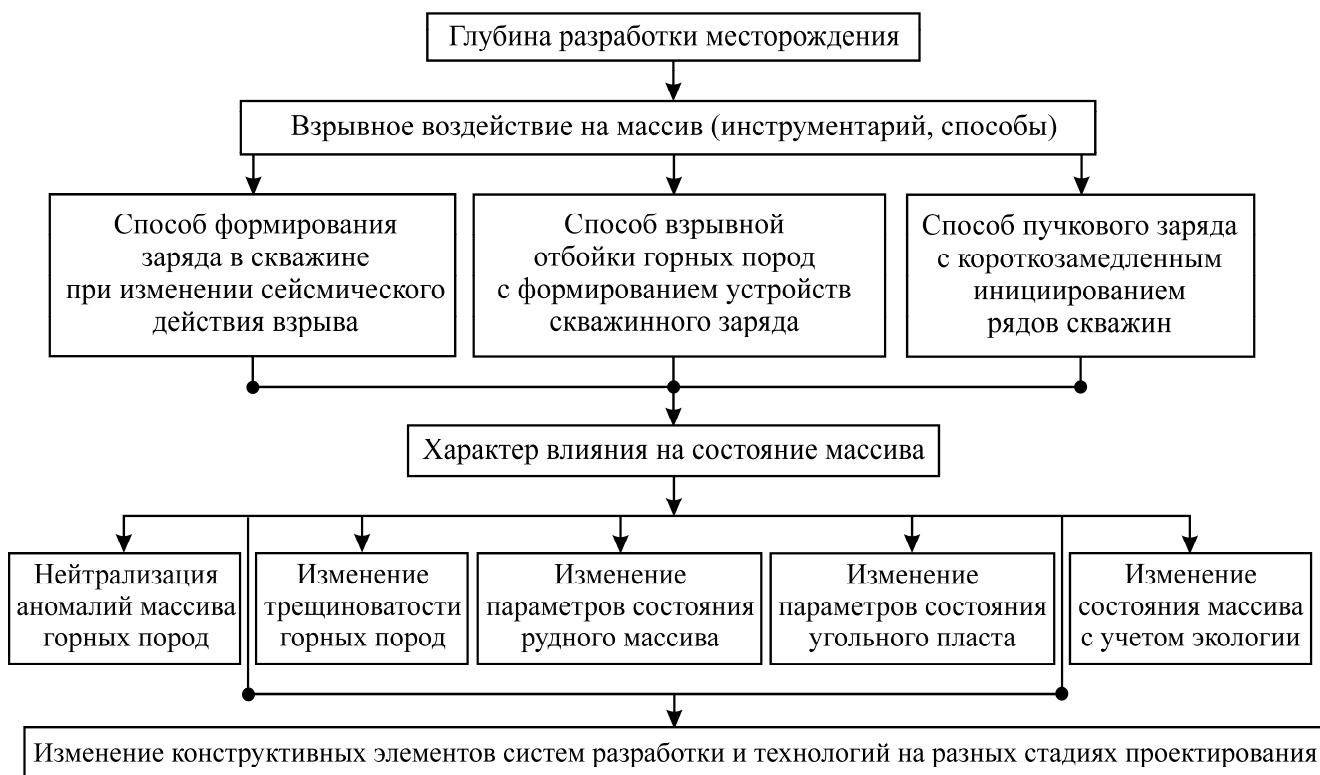


Рис. 1. Структура концепции влияния направленного взрывания на разработку месторождений полезных ископаемых

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

В основе численных методов для моделирования динамических задач геомеханики лежит механика сплошной среды [9, 10]. При этом решается основная система дифференциальных уравнений (включающая уравнения неразрывности и сохранения импульсов и энергии):

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{U} &= 0, \\ \rho \frac{dU_i}{dt} &= \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho F_i, \\ \frac{dE}{dt} &= \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} + \frac{dq}{dt}, \end{aligned}$$

где ρ — плотность геосреды; \vec{U} — вектор скорости; $U_i = dx_i / dt$ — компоненты вектора скорости; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; F_i — массовые силы; E — удельная внутренняя энергия; $\varepsilon_{ij} = 1/2(x_{i,j} + x_{j,i})$ — компоненты тензора деформаций; q — заданный приток энергии в систему.

Данная система уравнений замкнута и определяет модель среды, устанавливающую связь между тензорами напряжений и деформаций. Чтобы описать деформацию горных пород в условиях сжатия и сдвига с возможным превышением предела упругости, следует использовать упругопластическую модель. В этом случае скорость деформации можно представить как упругую и пластическую составляющие:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p.$$

Напряженное состояние упругой среды описывается законом Гука:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda(\dot{\theta} - \dot{\theta}^p)\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^p),$$

здесь λ, μ — коэффициенты Ламе; δ_{ij} — символ Кронекера.

Не рассматривая все зависимости данного теоретического подхода, отметим, что для замкнутой системы уравнений ставится краевая задача, которая определяется начальными и граничными условиями [12, 13]. Для демонстрации вычислительных возможностей выбранного численного метода проведено решение модельной задачи о взрыве удлиненного заряда в скважине неподалеку от поверхности горного массива. При анализе деформации и разрушения массива, а также свободной поверхности во время взрывной прокладки траншей такая задача имеет самостоятельный практический интерес.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Результат экспериментальной части данной работы — использование компьютерного моделирования методом сглаженных частиц с целью формирования направленного действия взрыва и возможности его использования для решения долговременных проблем горного производства. Исследования выполнены согласно патенту на способ нейтрализации влияния аномалий состояния массива сближенными зарядами на горные разработки [11]. Изобретение относится к горному делу, в частности комбинированной открыто-подземной разработке месторождений твердых полезных ископаемых. На рис. 2 приведены результаты моделирования направленного действия взрыва сближенными зарядами разновременного действия.

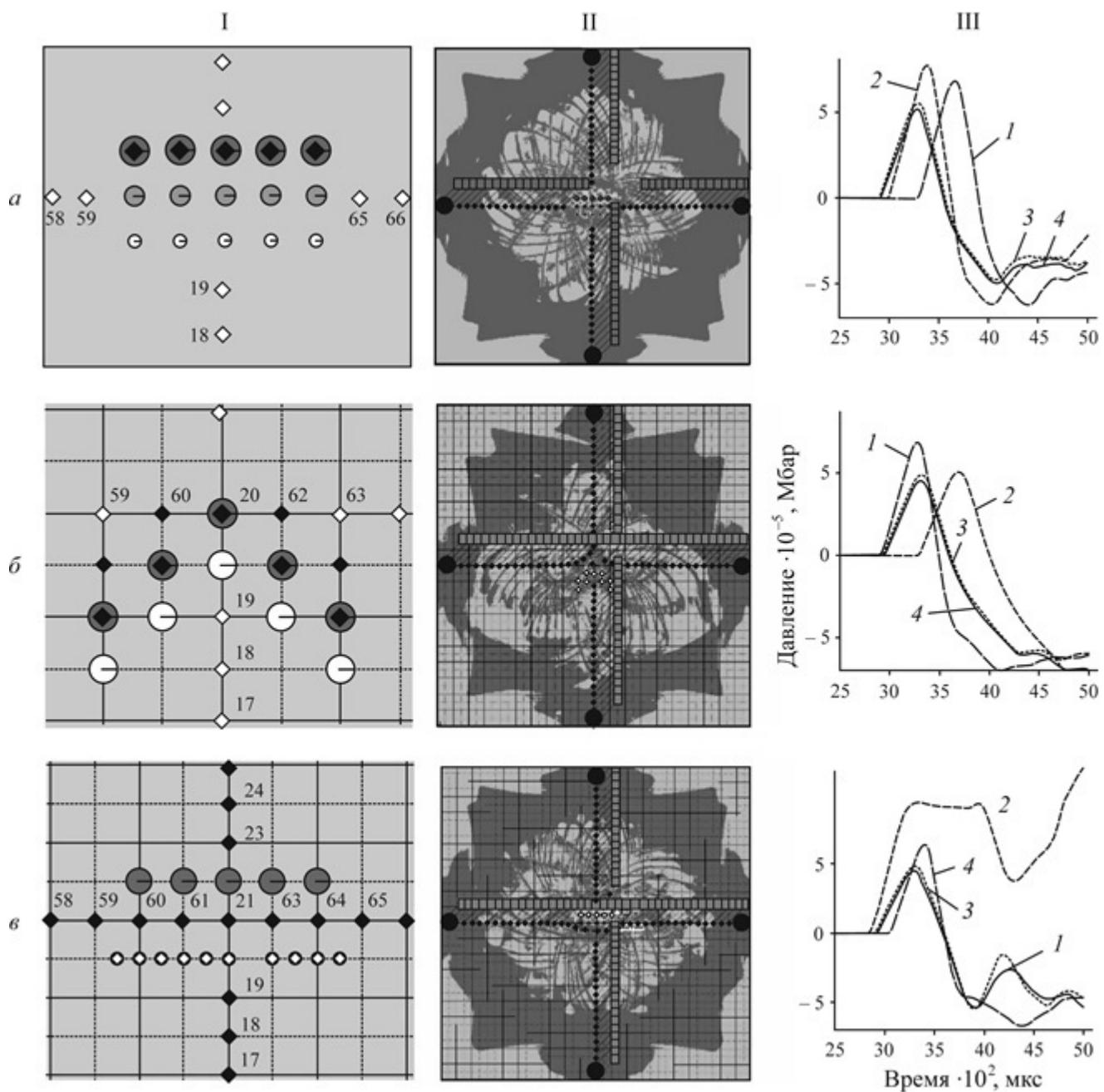


Рис. 2. Компьютерное моделирование направленного действия взрыва сплошных скважинных зарядов (*a*), сплошных и полых скважинных зарядов (*b*) и системы зарядов со скважинами (*c*) разного диаметра: I — система разновременного взрывания рядов сближенных зарядов (◆ — место расположения детонатора); II — характер зон пластической деформации породы или характер взрывного процесса (● — место расположения точек измерения параметров — 1, 2, 3, 4); III — зависимость изменения первого инварианта тензора напряжений от времени в характерных точках

На рис. 2 также показано развитие разновременного взрывания сближенными зарядами различного диаметра, наличие или отсутствие взрывчатого вещества ANFO в зависимости от параметров систем, в том числе от эффекта коммутации. Отчетливо видно существенное наличие направленного действия взрыва. Этот аспект можно использовать при изучении механизма взрыва угля для определения возможностей оптимизации динамического воздействия

на угольный пласт с помощью комбинированной модели газонасыщенного угля и для описания связи между взрывным повреждением угольного пласта и выделением газа [14, 15]. На основе такой модели методом SPH можно понять развитие зон разрушения или напряженно-деформированного состояния пластов в окрестностях скважины после взрыва. Исследованы схемы направленного взрывания для развития технологии предварительной дегазации угольных пластов и методов контролируемого выброса угля в атмосферу. Результаты исследования будут полезны при разработке теории о воздействии на углекислый газ, а также мер по снижению уровня опасности геодинамических явлений [16].

Предварительное исследование показало принципиальную возможность наличия эффекта направленного действия взрыва в горном производстве. Это можно использовать для управления геомеханическим состоянием массива горных пород при решении горных проблем. Результаты экспериментальных исследований подтвердили необходимость продолжения поисков вариантов и схем направленного взрывания для различных практических ситуаций.

ВЫВОДЫ

Теоретическими предпосылками и моделированием численным методом сглаженных частиц обоснована возможность влияния направленного взрывного воздействия на геомеханическое состояние горного массива и технологические компоненты систем разработки полезных ископаемых. В перспективе разработка практических аспектов использования данного эффекта для различных условий (в том числе предотвращения негативных) и глубины разработки рудных и угольных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закалинский В. М., Шиповский И. Е., Мингазов Р. Я. Буровзрывные работы в сложных условиях // Взрывное дело. — 2022. — № 134-91. — С. 44–53.
2. Одинцев В. Н., Закалинский В. М., Лапиков И. Н., Мингазов Р. Я. Моделирование направленности взрывного взаимодействия сближенных зарядов // Взрывное дело. — 2022. — № 136-93. — С. 5–24.
3. Малышев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т. Фундаментальное прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. — М.: Изд-во Акад. горн. наук, 2000. — 519 с.
4. Закалинский В. М., Мингазов Р. Я., Шиповский И. Е. Влияние горно-технологических факторов на буровзрывные работы при разработке месторождений на большой глубине // Проблемы недропользования. — 2022. — № 2 (33). — С. 46–54.
5. Zhang J., Wu S., Song Z., et al. Study on the anti-scouring and energy absorption characteristics of coupled broken coal rock mass and packed STFs, Int. J. Rock Mech. Rock Eng., 2024. DOI:10.1007/s00603-023-03723-3.
6. Wang B. and Li H. Contribution of detonation gas to fracturing reach in rock blasting: insights from the combined finite-discrete element method, Computat. Particle Mechan., 2023. DOI:10.1007/s40571-023-00645-3.
7. Zhang L., Qi Q., Chen X., Zuo S., Deng K., Bi R., and Chai J. Impact of stimulated fractures on tree-type borehole methane drainage from low-permeability coal reservoirs, Minerals, 2022, Vol. 12, No. 8. — 940.
8. Haoyu Han, Daisuke Fukuda, Jianbin Xie, Ebrahim Fathi Salmi, Ewan Sellers, Hongyuan Liu, Huaming An, and Andrew Chan. Rock dynamic fracture by destress blasting and application in controlling rockbursts in deep underground, Comp. Geotech., 2023, Vol. 155. — 105228.

9. Курлена М. В., Сердюков С. В. Десорбция и миграция метана в термодинамически неравновесном угольном массиве // ФТПРПИ. — 2010. — № 1. — С. 61–68.
10. Балашова Т. А. Исследование влияния динамических нагрузок на интенсификацию десорбции метана и выбросоопасность пласта: дис. ... канд. техн. наук. — Кемерово: КузГТУ, 1998.
11. Пат. 2783817 РФ. Способ нейтрализации влияния аномалий массива на горные разработки / В. Н. Захаров, С. Д. Викторов, В. М. Закалинский, И. Е. Шиповский, Р. Я. Мингазов, Б. Н. Поставин, А. В. Дугарцыренов, А. А. Еременко // Опубл. в БИ. — 2022. — № 32. — 11 с.
12. Young G. B. C. Computer modelling and simulation of coalbed methane resources, Int. J. Coal Geol., 1998, Vol. 35. — P. 369–379.
13. Zhu W. C., Liu J., Sheng J. C., and Elsworth D. Analysis of coupled gas flow and deformation process with desorption and Klinkenberg effects in coal seams, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2007, Vol. 44, No. 7. — P. 971–980.
14. Connell L. D. Coupled flow and geomechanical processes during gas production from coal seams, Int. J. Coal Geol., 2009, Vol. 79, No. 1–2. — P. 18–28.
15. Noack K. Control of gas emissions in underground coal mines, Int. J. Coal Geol., 1998, Vol. 35. — P. 57–82.
16. Шиповский И. Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессточного метода // Науковий вісник НГУ–НГУ. — 2014. — Вып. 1 (145). — С. 76–82.

Поступила в редакцию 06/II 2024

После доработки 10/III 2024

Принята к публикации 14/III 2024