

**Ключові слова:** інтенсифікація, метан вугільних родовищ, поверхнева дегазаційна свердловина, дебіт, вуглепородний масив.

**Abstract.** This article points such pressing issues as methane recovery from the coal deposits, its use as an alternative energy source, and its reserves on the territory of Ukraine. A new approach to mining the deposits with geological resources is presented which considers the coal mines as enterprises for mining gas-and-coal deposits. A method for borehole completion is described which impacts by a carbon-containing component, such as methane, which is released into the borehole from the gas-saturated coal-rock mass. The impact was industrially tested in the A.F. Zasyadko Mine where basic algorithms and dependences of the method of coal-and-rock mass degassing were used for intensifying the methane recovery through the surface degasification boreholes and with applied pneumohydrodynamic impact.

**Keywords:** intensification, coalbed methane, surface degassing boreholes, production rate, coal-and-rock massif.

*Статья поступила в редакцию 16.09.2015*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым*

УДК 622.831.322: 532.528

**Круковская В.В.**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**Зберовский В.В.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ  
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА И ДВУХФАЗНОЙ  
ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА ПРИ НАГНЕТАНИИ ВОДЫ В  
УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ**

**Круковська В.В.**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.  
**Зберовський В.В.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
(ИГТМ НАН України)

**РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЗВ'ЯЗАНИХ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ  
НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МАСИВУ І ДВОХФАЗНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ  
РІДИНИ ТА ГАЗУ ПРИ НАГНІТАННІ ВОДИ У ВУГІЛЬНИЙ ПЛАСТ**

**Krukovskaya V.V.** D.Sc. (Tech.), Senior Researcher,  
**Zberovskiy V.V.** Ph.D. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)

**CALCULATION OF PARAMETERS FOR COUPLED PROCESSES OF THE  
ROCK STRESSED STATE CHANGING AND TWO-PHASE FLUID AND  
GAS FILTRATION AT WATER INFUSION INTO THE COAL SEAM**

**Аннотация.** Предложен метод имитационного компьютерного моделирования процессов, происходящих в забое горной выработки при гидрорыхлении угольного пласта. Этот метод учитывает не только изменение напряженного состояния углепородного массива в

результате разгрузки при проведении выработки и гидровоздействия, но и участие жидкости и газа в процессе образования разгруженной области с повышенной трещиноватостью. Учитывается также зависимость изменения абсолютной фильтрационной проницаемости от соотношения компонент тензора главных напряжений в каждой точке исследуемой области.

Приведены результаты численного моделирования и распределения значений геомеханических и фильтрационных параметров в различные моменты времени гидровоздействия на угольный пласт в забое горной выработки. Выполненные исследования позволят усовершенствовать выбор технологических параметров высоконапорного нагнетания жидкости, повысить безопасность ведения горных работ.

**Ключевые слова:** импульсный и статический режимы гидрорыхления угольного пласта, связанные процессы, численное моделирование.

**Актуальность постановленной задачи.** В практике ведения горных работ для снижения концентрации напряжений и предотвращения газодинамических явлений (ГДЯ) в забоях выработок применяются различные способы воздействия на углепородный массив. На неразгруженных горными работами угольных пластах «Правилами ...» [1] рекомендуются локальные способы воздействия. Однако в условиях больших глубин широко применяемые способы гидрорыхления и гидроотжима стали недостаточно эффективными, так как не обеспечивают в полной мере безопасность работ в забое выработки по газодинамическому фактору.

**Анализ известных решений.** Из способов, основанных на нагнетании жидкости, наиболее эффективными являются гидроимпульсное и гидродинамическое воздействие. Технология применения этих способов находится на стадиях разработки и усовершенствования. Несмотря на относительно небольшой опыт их применения на шахтах Донбасса, отмечается высокая надежность и эффективность предотвращения ГДЯ. Вместе с тем основой для принятия новых технических решений в конкретных горно-геологических условиях являются результаты горно-экспериментальных работ и установленные эмпирические зависимости. Повысить надежность и обоснованность принятия таких решений возможно с помощью методов имитационного моделирования технологических процессов и процессов, происходящих в забое горной выработки при гидровоздействии на угольный пласт. Разработка математической модели и численное моделирование связанных процессов изменения напряженно-деформированного состояния и двухфазной фильтрации жидкости и газа в газонасыщенном углепородном массиве при высоконапорном нагнетании жидкости в выбросоопасный угольный пласт необходимы для определения размеров области гидрообработки и обоснования технологических параметров гидрорыхления.

Для теоретического описания этих процессов необходимо объединить в единую связанную систему дифференциальные уравнения, описывающие изменение во времени параметров напряженного состояния углепородного массива вокруг выработки; фильтрации жидкости, нагнетаемой в угольный пласт; фильтрации метана, содержащегося в трещинно-поровом пространстве. При этом следует учитывать, что поле проницаемости постоянно изменяется в зави-

симости от НДС вмещающего массива.

Аналитическое решение задачи в такой постановке невозможно из-за ее сложности. Существующие решения ограничены множеством допущений, не учитывают наличие в геосистеме воды и газа и не позволяют описать многообразие взаимных связей между процессами изменения НДС горного массива, развития области фильтрации и движения в ней воды и метана при различных режимах нагнетания жидкости в скважину.

Численные методы предоставляют гораздо большую свободу при моделировании реальных процессов. Например, авторы [2] решают совместные уравнения фильтрации жидкости и деформации пористой среды в конечно-элементных пакетах ABAQUS и MSC.Marc. Они моделируют гидроразрыв угольного пласта путем нагнетания в пласт воды через скважину, пробуренную с земной поверхности, до давления, которое не превышает геостатическое. Коэффициент фильтрации авторы вводят как функцию от давления жидкости. Однако, наличие в трещинно-поровом пространстве метана и зависимость фильтрационной проницаемости твердой фазы от ее напряженного состояния являются важными факторами, без учета которых невозможно адекватно отобразить многообразие физических процессов, происходящих при гидроразрыве газонасыщенный угольный пласт, и получить максимально точные результаты расчетов.

**Цель работы** – разработка математической модели и численное моделирование связанных процессов изменения напряженно-деформированного состояния и двухфазной фильтрации жидкости и газа в газонасыщенном угленосном массиве при высоконапорном нагнетании жидкости в выбросоопасный угольный пласт для определения размеров области гидрообработки и оценки эффективности противовыбросных мероприятий.

**Математическая постановка задачи.** Обычно в природе протекание любого физического процесса сопровождается одним или несколькими зависимыми процессами геомеханики, химии, теплофизики. Их взаимное влияние может иметь различные формы связи, и чтобы найти распределение искомым величин, необходимо решить связанную систему дифференциальных уравнений. Рассмотрим процессы, происходящие при проведении горной выработки в газонасыщенном массиве горных пород во время и после нагнетания жидкости.

Последовательность моделируемых технологических операций с параметрами гидрорыхления, принятыми для этого расчета, следующая:

- бурение технологических скважин на глубину 3,0 м, замер начальной скорости газовыделения;
- добуривание скважин до 6,0 м, их герметизация на глубину 4,0 м, гидрорыхление пласта в статическом или импульсном режиме;
- бурение контрольных шпуров до глубины 3,0 м и замер начальной скорости газовыделения;
- подвигание забоя на 3,0 м.

Горный массив на больших глубинах практически непроницаем. Но, при образовании в нем какой-либо полости, например скважины или выработки, в

массиве происходит перераспределение поля напряжений, связанное с разгрузкой вмещающего массива от горного давления. Вокруг полости развивается система трещин и образуется область фильтрационной проницаемости, в которой под действием перепада давления метан движется из глубины угольного массива к открытой поверхности.

При высоконапорном нагнетании закачиваемая в угольный пласт жидкость перемещается вглубь массива, раскрывает трещины напластования, оттесняет метан и, смачивая поверхность угля, препятствует газовой выделению из его микродефектов. В прискважинной зоне происходит увеличение трещиноватости и расширение области фильтрации (области гидровоздействия). После сброса давления по образовавшимся трещинам, начинается процесс обратной фильтрации жидкости и газа.

Таким образом, для моделирования геомеханических и фильтрационных процессов при гидровоздействии на угольный пласт в забое выработки необходимо провести расчет параметров связанных процессов изменения во времени НДС массива под действием силы тяжести и двухфазной нестационарной фильтрации жидкости и газа в нарушенном массиве с учетом изменения проницаемости угольного пласта в зависимости от его напряженного состояния. Решение задачи численного моделирования гидроимпульсного воздействия приведено в работе [3, 4]. В соответствии с блок-схемой алгоритма решения задачи на каждой временной итерации рассчитывались:

- поле напряжений  $\sigma_{ij}$ ;
- поле коэффициентов проницаемости  $K(\sigma_{ij})$  в зависимости от параметров напряженного состояния угольного пласта и горной породы;
- параметры фильтрации жидкости и размеры области гидровоздействия (область фильтрации воды из шпура, определяемая через насыщенность трещинно-порового пространства водой  $S_w$ );
- поле коэффициентов газовой проницаемости  $K_g = K(\sigma_{ij}) - S_w$ ;
- параметры фильтрации метана.

Моделирование высоконапорного нагнетания жидкости осуществляется посредством приложения соответствующей нагрузки в узлах фильтрационной части скважины на нужных временных итерациях.

Изменение во времени напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки без учета сил инерции описывается соотношением

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + P_i(t) = \mu_s \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} \right); \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij,j}$  – производные от компонент тензора напряжений по  $x, y$ ;  $X_i(t)$  – внешние силы;  $P_i(t)$  – силы, обусловленные давлением газа и жидкости;  $u_i$  – перемещения;  $t$  – время.

В матричной форме дифференциальное уравнение (1) может быть записано

в следующем виде

$$[C_s] \frac{\partial}{\partial t} \{U\} + [K_s] \{U\} + \{F_s\} = 0, \quad (2)$$

где  $[K_s]$  – матрица жесткости для твердого тела;  $\{U\}$  – вектор узловых перемещений;  $[C_s]$  – матрица демпфирования для твердого тела;  $\{F_s\}$  – вектор усилий в узлах.

В качестве начальных условий задачи задаются распределения напряжений

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma H \\ \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma H, \\ \sigma_{zz}|_{t=0} &= \lambda \gamma H \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\gamma$  – усредненная плотность вышележащих горных пород;  $H$  – глубина разработки;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора.

Граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} u_x|_{\Omega_1} &= 0 \\ u_y|_{\Omega_2} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Omega_1$  – вертикальные границы внешнего контура;  $\Omega_2$  – горизонтальные границы внешнего контура.

Суммарная сила  $\{F_s\}$ , приложенная в узлах рассматриваемой области, равна сумме сил, обусловленных действием геостатического давления  $\{F_0\}$  и давления жидкости и газа  $\{F_p\}$ , которое определяется путем решения двухфазной нестационарной задачи течения жидкости и метана в трещиновато-пористой деформируемой среде

$$\{F_s\} = \{F_0\} + \{F_p\}.$$

Задача решается в упруго-пластической постановке с помощью метода конечных элементов. Для решения полученных систем уравнений применяется итерационный метод сопряженных градиентов, при котором производится согласование невязок, возникающих в результате подстановки пробных решений в исходные алгебраические уравнения. Для дискретизации во времени применяется конечно-разностный метод.

Уравнения неразрывности газового потока в плоской постановке при наличии источника газовой выделению можно представить в виде

$$\mu_g \frac{\partial p}{\partial t} + k_g \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q_g(t) = 0, \quad (5)$$

где  $q_g$  – интенсивность источников газовой выделения;  $k_g$  – коэффициент проницаемости;  $\mu_g$  – вязкость газа.

Начальное условие:

$$p|_{t=0} = p_0, \quad (6)$$

где  $p_0$  – давление метана в нетронутом массиве.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} p|_{\Omega_1(t)} &= p_0; \\ p|_{\Omega_2} &= p_v; \quad p_v = 0,1 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\Omega_1(t, x, y, z)$  – изменяющаяся во времени граница области фильтрации;  $\Omega_2$  – внутренний контур (выработка);  $p_v$  – давление воздуха в выработке.

Путем минимизации функционала, связанного с уравнением (5), оно может быть преобразовано к соотношению

$$[C_g] \frac{\partial \{P\}}{\partial t} + [K_g] \{P\} + \{F_g\} = 0, \quad (8)$$

Чтобы получить решения дифференциального уравнения (8) на определенном временном промежутке, также применяется конечно-разностный метод, с помощью которого для достаточно малых значений  $\Delta t$  уравнение (8) преобразовывается к виду

$$\left( [K_g] + \frac{2}{\Delta t} [C_g] \right) \{P\}_{t+\Delta t} = \left( \frac{2}{\Delta t} [C_g] - [K_g] \right) \{P\}_t - (\{F_g\}_t + \{F_g\}_{t+\Delta t})$$

Считается, что на момент времени  $t$  распределение давлений задано. Тогда для достаточно малых значений  $\Delta t$  получаем распределение давлений на момент времени  $t + \Delta t$ . Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого текущего момента времени.

Неустановившаяся фильтрация жидкости в плоской постановке описывается соотношением (силами гравитации будем пренебрегать)

$$\mu_w \frac{\partial s}{\partial t} = K_w \left( \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} \right) + q_w(t), \quad (9)$$

где  $\mu_w$  – вязкость жидкости;  $S$  – концентрация жидкости, насыщенность жидкостью трещинно-порового пространства;  $K_w$  – коэффициент проницаемости для жидкости;  $q_w$  – интенсивность источников выделения.

Уравнение (9) можно записать в матричном виде

$$[C_w] \frac{\partial \{S\}}{\partial t} + [K_w] \{S\} + \{F_w\} = 0, \quad (10)$$

где  $[C_w]$  – матрица демпфирования;  $\{S\}$  – вектор насыщенности жидкостью трещинно-порового пространства;  $[K_w]$  – матрица газовой проницаемости элемента;  $\{F_w\}$  – вектор поглощения (выделения) жидкости.

Начальное условие:

$$s|_{t=0} = 0. \quad (11)$$

Граничное условие:

$$s|_{\Omega_3} = 100\%. \quad (12)$$

В то время как для описания однофазной фильтрации достаточно единственной зависимой переменной  $p$  или  $s$ , для многофазной фильтрации нужны обе переменные и дополнительные соотношения [5]:

$$\begin{aligned} P_c &= p_g - p_w = f(S_w); \\ S_w + S_g &= 1; \end{aligned}$$

где  $P_c$  – давление в трещинно-поровом пространстве.

В приведенных уравнениях индексы «w» и «g» обозначают соответственно жидкую и газообразную фазы.

В трехкомпонентной среде «твердое тело – газ – вода» подвижные компоненты (газ и вода) перемещаются совместно в трещинно-поровом пространстве твердого тела, имеющего определенную, зависящую от соотношения компонент тензора главных напряжений, абсолютную проницаемость. Ранее было показано, что

- в нетронутом горном массиве

$$k = 0 \quad \text{при} \quad Q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H} < 0,6;$$

- в зоне упругих деформаций и равнокомпонентного сжатия

$$k = 0 \quad \text{при } Q < 0,7; \quad P = \frac{\sigma_3}{\gamma H} > 0,25;$$

- в области начального и интенсивного трещинообразования

$$k = k_{\min} \quad \text{при } 0,7 < Q < 0,8 \text{ и}$$

$$k = e^{0,26Q-4,65} \quad \text{при } Q > 0,8;$$

- в области разрушения горных пород

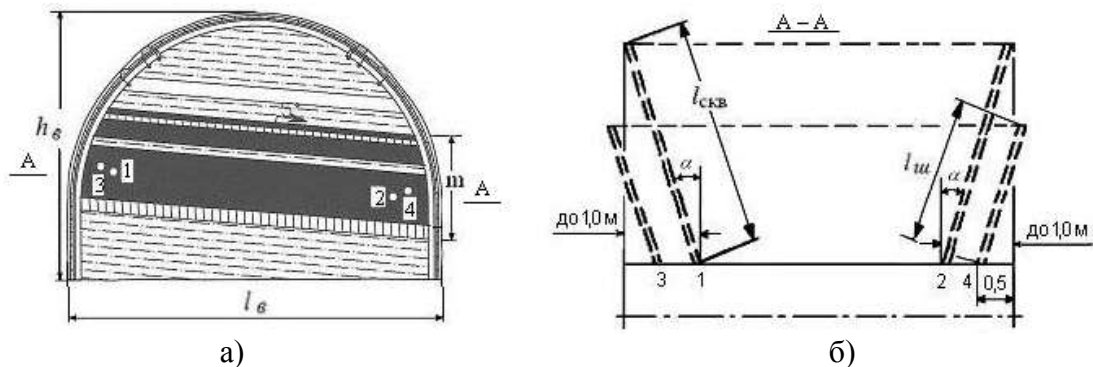
$$k = k_{\max}, \quad \text{при } P < 0,1; \quad Q > 0,8.$$

Абсолютная проницаемость  $k$  рассматривается как величина, характеризующая фильтрационную способность твердой фазы, где подвижная фаза занимает все свободное пространство. Когда в трещинно-поровой среде присутствуют несколько подвижных фаз, термин «проницаемость» должен быть связан с каждой отдельной фазой. Фазовую, относительную, проницаемость удобно выразить в долях абсолютной проницаемости [6]

$$k = k_w + k_g = 100\% .$$

Таким образом, поставленная задача описывается системой уравнений (2), (8), (10) с граничными условиями (4), (7), (12) и начальными условиями (3), (6), (11).

**Физическая постановка задачи.** Для сопоставления результатов моделирования и горно-экспериментальных работ рассмотрим результаты исследований гидрорыхления пласта  $i_3^1$  гор. 915 м в забое 24-го восточного конвейерного штрека ш/у «Суходольское-Восточное» ПАО «Краснодонуголь» (рис. 1).



1, 2 – технологические скважины; 3, 4 – контрольные шпурь;  
 $l_{ш}$  – длина шпура, м;  $h_e$ ,  $b_e$  – высота и ширина выработки, м;  
 $\alpha$  – угол доворота оси скважины на массив

Рисунок 1 – Технологическая схема проведения горно-экспериментальных работ:



а – сечение выработки; б – сечение пласта по А-А

Исследования газодинамических свойств угольного пласта проводились в три этапа: без противовыбросных мероприятий, при гидрорыхлении пласта в статическом режиме нагнетания жидкости и при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт. Эффективность гидрообработки массива при различных режимах нагнетания жидкости оценивалась по начальной скорости газовыделения из контрольных шпуров.

При моделировании гидровоздействия были приняты следующие параметры: природная газоносность пласта  $x = 20 \text{ м}^3/\text{т}$ ; мощность пласта  $m = 1,5 \text{ м}$ ; глубина бурения технологических скважин  $6,0 \text{ м}$ ; глубина герметизации  $l_2 = 4,0 \text{ м}$ ; глубина залегания  $H = 1000 \text{ м}$ . Физико-механические свойства пород представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики породы

Порода	Модуль упругости, $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Сцепление, $C$ , МПа	Угол внутреннего трения, $\varphi^\circ$	Прочность на растяжение, $\sigma_p$ , МПа
Аргиллит	$10^4$	0,2	3,5	30	-2
Уголь	$5 \times 10^3$	0,2	1,75	30	-1

Параметры гидрорыхления угольного пласта при статическом нагнетании жидкости определены в соответствии с нормативной методикой [1], параметры импульсного нагнетания жидкости – по методике ИГТМ НАН Украины.

В начале расчета моделирование режима воздействия жидкостью на угольный пласт осуществляется посредством приложения соответствующей нагрузки в фильтрационной части скважины на временных итерациях  $i=1$ ,  $i=3$  и  $i=5$ . На шестой итерации происходит сброс давления жидкости в скважине и оценка эффективности способа, после чего, на 10-й итерации, происходит подвигание забоя, затем начинается замер объема метана, выделившегося в контрольный шпур, в единицу времени.

Измерение начальной скорости газовыделения из контрольных шпуров выполнялось при исследованиях на всех этапах: без проведения противовыбросных мероприятий; после гидрорыхления пласта в статическом режиме нагнетания жидкости; после проведения гидроимпульсного воздействия на угольный пласт.

Сравнение размеров области гидровоздействия на угольный пласт, геомеханические и фильтрационные параметры выполнено для второго и третьего этапов исследований.

**Анализ результатов расчета.** На рис. 2 показаны распределения значений геомеханического параметра  $Q$ , характеризующего степень разнокомпонентности поля напряжений, для случаев статического и импульсного режима воздействия на угольный пласт.

Как видно из рисунков, область повышенной разнокомпонентности

( $0,4 < Q < 0,8$ ) вокруг скважины увеличивается со временем, при гидроимпульсном воздействии она имеет большие размеры, чем при гидрорыхлении. Зона неупругих деформаций в области гидровоздействия при статическом режиме нагнетания практически отсутствует, что обуславливает низкую проницаемость области фильтрации. А при импульсном воздействии вокруг фильтрационной части скважины формируется обширная область неупругих деформаций, которая возникает на 1-5 итерациях гидроимпульсного воздействия и далее остается неизменной. В этой области выполняется критерий Кулона-Мора и параметр  $P = \sigma_3 / \gamma H < 0,1 \div 0,3 \cdot \sigma_{сж} / \gamma H$ , что позволяет характеризовать ее как область разрушения.

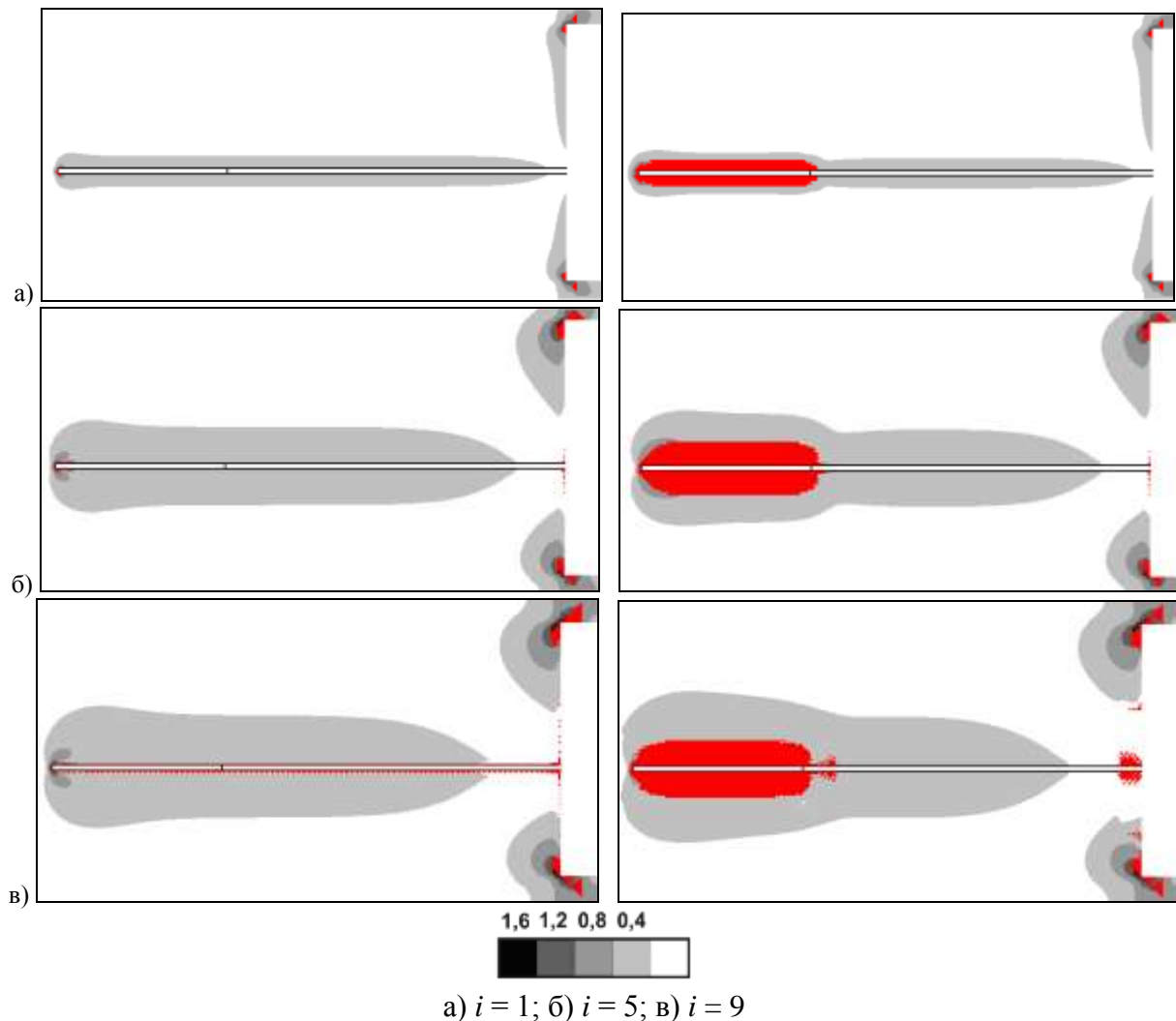
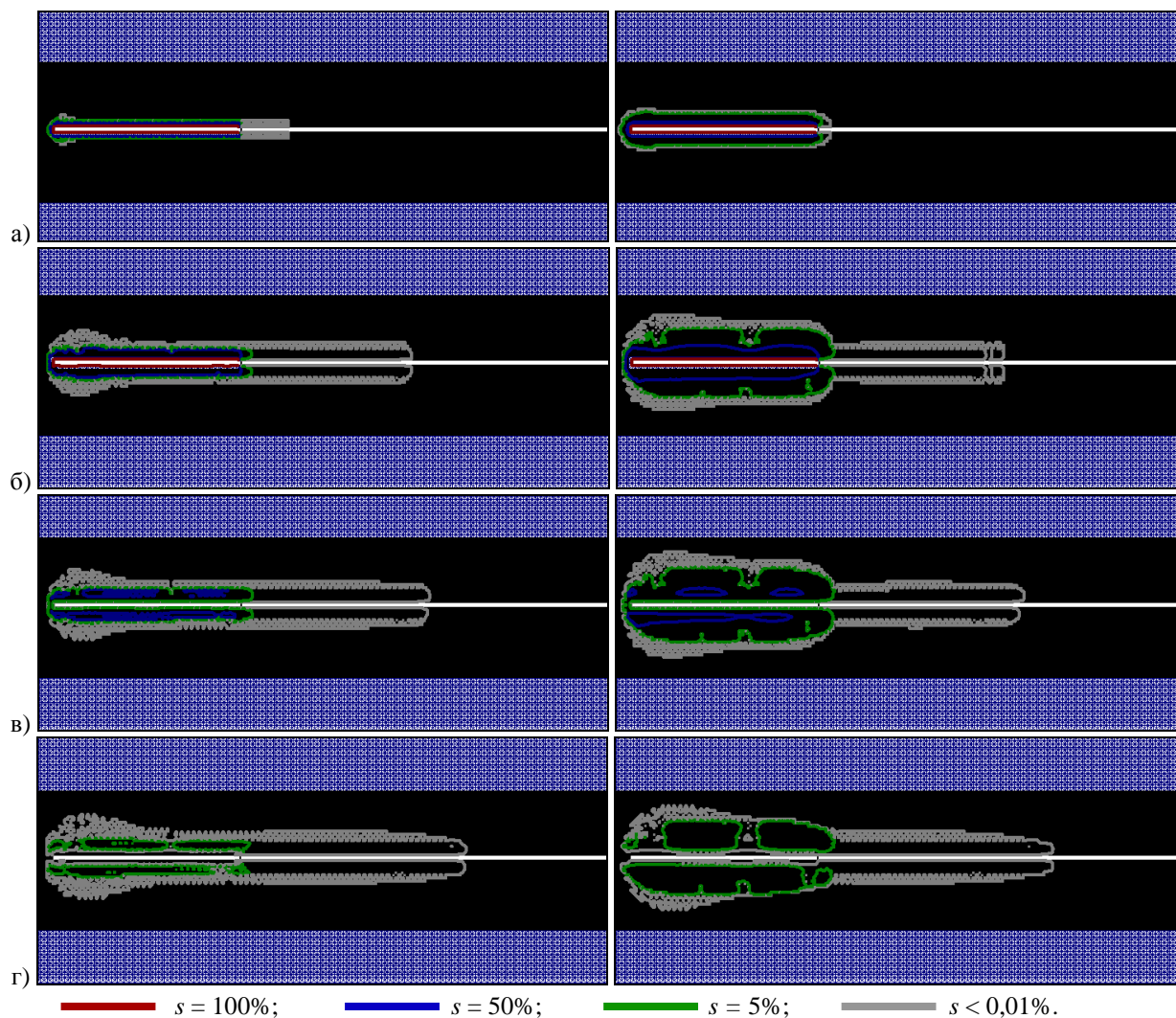


Рисунок 2 – Распределения значений параметра Q и зоны неупругих деформаций при статическом (слева) и импульсном (справа) режимах воздействия

Хрупкое разрушение угля характеризуется ростом деформаций, разрыхления и, соответственно, объема материала. Это приводит к резкому росту проницаемости угля (коэффициент проницаемости принимает здесь максимальные значения) и увеличению зоны равномерного гидрорыхления пласта.

На рис. 3 приведены линии уровня насыщенности порового пространства

водой в различные моменты времени при гидрорыхлении пласта в статическом и импульсном режимах. Как и следовало ожидать, область гидровоздействия при импульсном нагнетании имеет значительно большие размеры, ее радиус в центральной части в 2 раза превышает радиус насыщенной жидкостью зоны при статическом режиме воздействия. При прекращении гидроимпульсного воздействия, начиная с 6-й временной итерации, значения насыщенности жидкостью трещинно-порового пространства  $s$  в области фильтрации начинают снижаться. На 9-й итерации они падают до 5 %, а в отдельных областях и ниже.

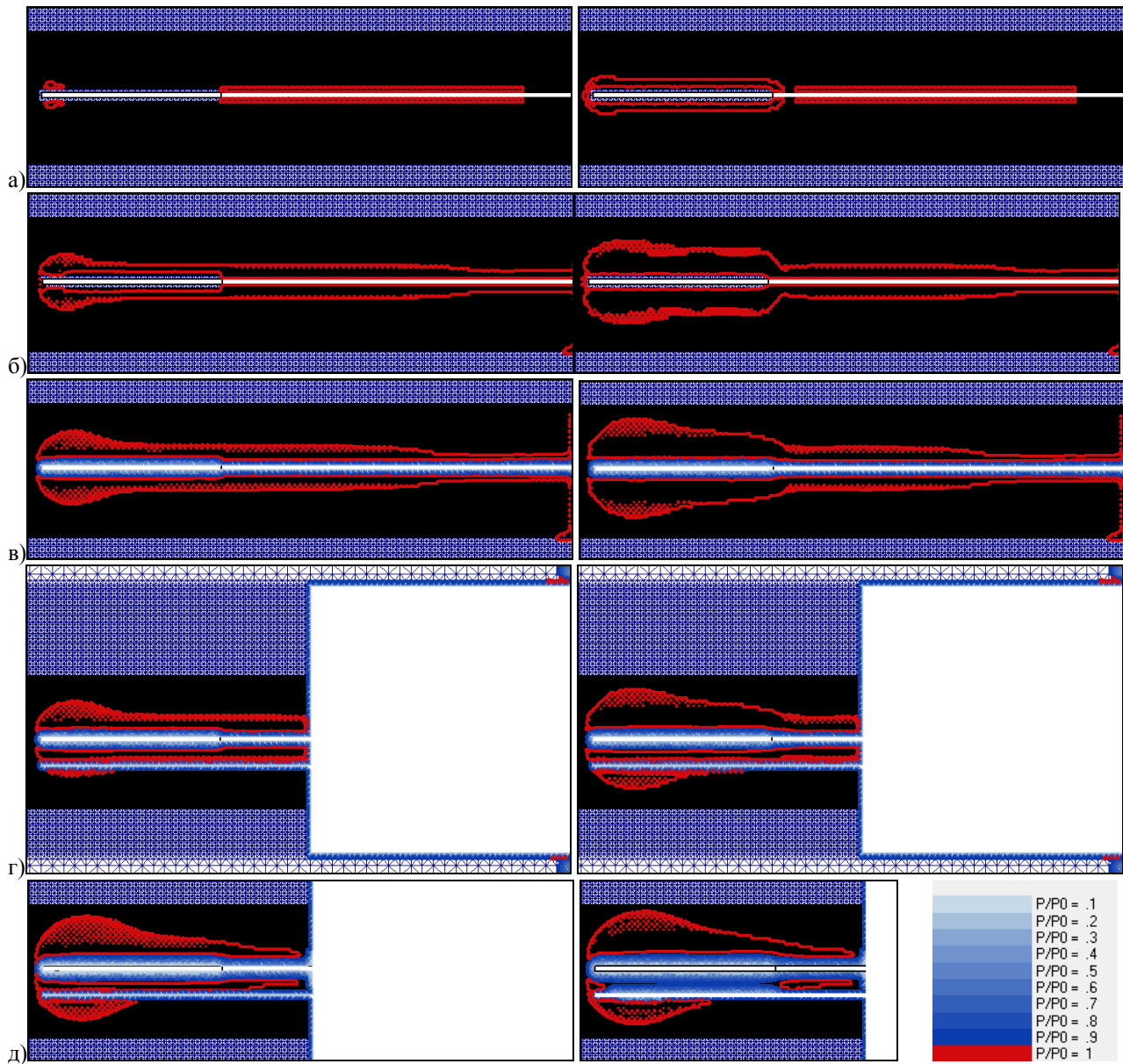


а)  $i = 1$ ; б)  $i = 5$ ; в)  $i = 6$ ; г)  $i = 9$

Рисунок 3 – Область гидровоздействия, изолинии насыщенности водой трещинно-порового пространства при статическом (слева) и импульсном (справа) режимах воздействия

Размеры области гидровоздействия на угольный пласт при импульсном нагнетании значительно превышают размеры области статического нагнетания (рис. 3 г). Изобары давления метана в различные моменты времени показаны на рис. 4. Увлажненные области с оттесненным метаном показаны изобарами  $p/p_0 \geq 1$ . После прекращения нагнетания жидкости в скважину, 6-9 итерации, начинается медленная фильтрация метана в нарушенной области. Микротре-

шины и поры при этом еще закрыты смачивающей фазой воды, поэтому отток метана из них затруднен. На 10-й временной итерации (рис. 4 г) происходит подвигание забоя выработки на 3,0 м. Фильтрация метана в угольном пласте продолжается и область, подвергшаяся гидроразрыву, постепенно дегазируется (рис. 4 д).



а)  $i = 1$ ; б)  $i = 5$ ; в)  $i = 6$ ; г)  $i = 9$ ; д)  $i = 25$

Рисунок 4 – Изобары относительного давления метана при статическом (слева) и импульсном (справа) режимах воздействия

При гидроимпульсном воздействии область, в которой  $p/p_0 < 1$ , имеет большие размеры, следовательно, фильтрация метана в ней происходит немного быстрее, чем при гидрорыхлении.

Для оценки достоверности решения задачи сравним начальную скорость газовыделения из контрольных шпуров с фактическими данными, полученными в

24-ом восточном конвейерном штреке ш/у «Суходольское-Восточное», при трех вариантах: а) противовыбросные мероприятия не проводятся; б) при гидрорыхлении угольного пласта; в) при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт (рис. 5).

По сопоставлению расчетных и фактических данных можно отметить, что моделирование выполнено с достаточно высокой точностью, относительная погрешность расчетных данных соответственно при гидроимпульсном воздействии, при гидрорыхлении и при отсутствии противовыбросных мероприятий – 10,6 %; 17,5 %; 11,9 %.

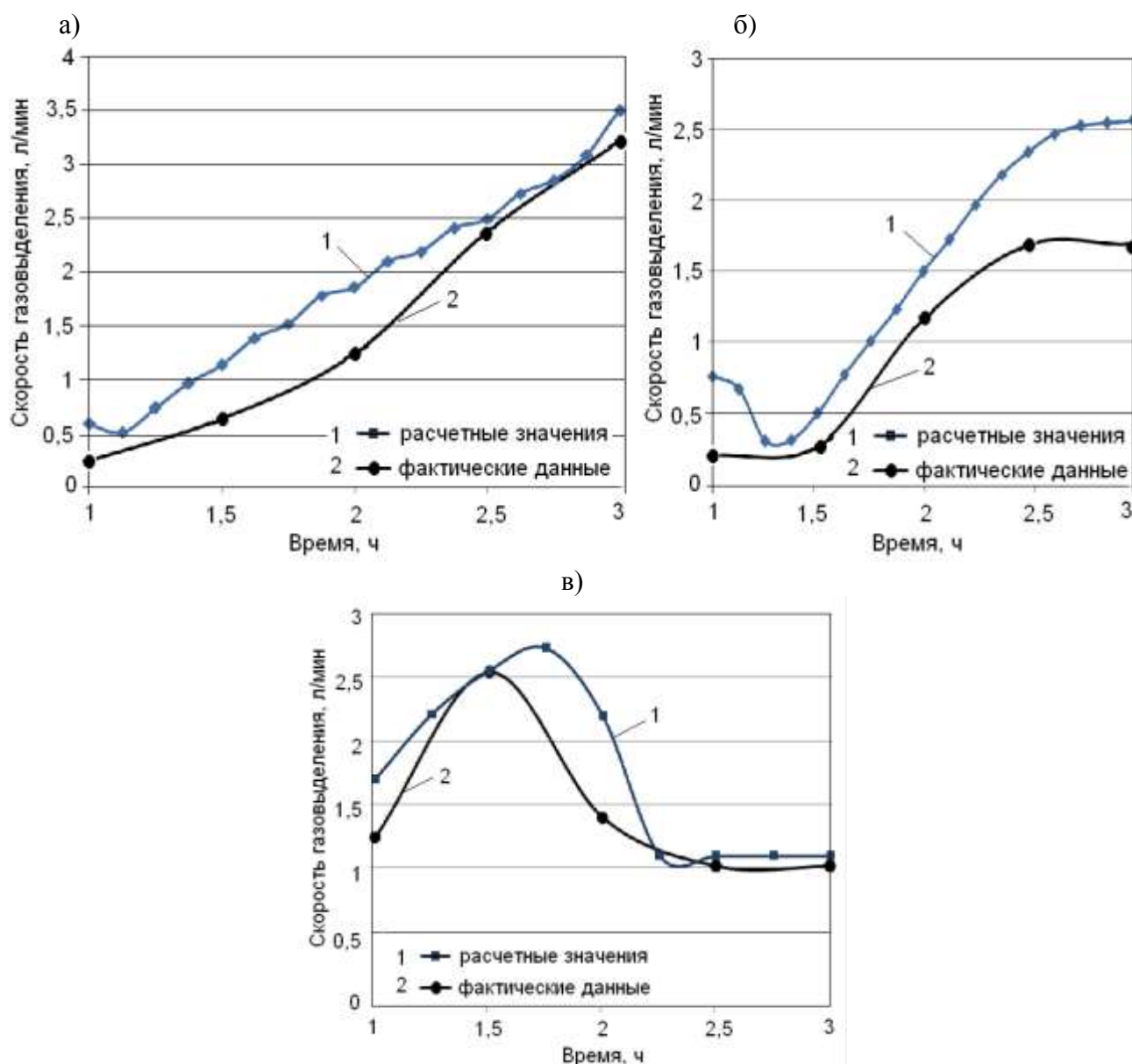


Рисунок 5 – Изменение начальной скорости газовой выделении из контрольных шпуров

**Выводы.** При помощи разработанной математической модели связанных процессов изменения напряженно-деформированного состояния углепородного массива и двухфазной фильтрации жидкости и газа в нарушенной области при различных способах нагнетания воды в скважину проведено исследование

напряженного состояния в забое выработки, распределения насыщенности водой трещинно-порового пространства и давления метана в угольном пласте вокруг технологической скважины, изменения средней скорости фильтрации метана и скорости газовой выделенности из контрольных шпуров. Показано, что область повышенной разнокомпонентности вокруг скважины и зона неупругих деформаций при импульсном режиме имеет большие размеры, чем при статическом.

Характер распределения полученных зависимостей и расчетных данных с достаточно высокой точностью совпадает с данными измерения начальной скорости газовой выделенности, полученными при проведении мероприятий по предотвращению внезапных выбросов угля и газа в забое 24-го восточного конвейерного штрека пласта  $i_3^1$  гор. 915 м ш/у «Суходольское-Восточное».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям: СОУ 10.1.001740088-2005. – [Действ. с 30.12.2005] / А.Ф. Булат, С.П. Минеев [и др.]. - Офиц. изд. – Киев: Минуглепром Украины, 2005. – 225 с. – (Нормативный документ Минуглепрома Украины. Стандарт).
2. Nasedkina, A.A. A model for hydrodynamic influence on a multi-layer deformable coal seam / A.A. Nasedkina, A.V. Nasedkin, G.A. Iovane // *Computational Mechanics*, 2008. – V. 24. – №3. – P. 379-389.
3. Численное моделирование гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты / А.Ф. Булат, В.В. Круковская, А.П. Круковский [и др.] // *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / ІГТМ НАН України. - Дніпропетровськ, 2012. – № 105. – С.14-25.*
4. Булат, А.Ф. Сравнение параметров связанных процессов изменения НДС и фильтрации жидкости и газа при различных режимах нагнетания воды в угольный пласт / А.Ф. Булат, В.В. Круковская, В.В. Зберовский // *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / ІГТМ НАН України. - Дніпропетровськ, 2013. – № 108. – С.197-205.*
5. Азиз, Х. Математическое моделирование пластовых систем / Х. Азиз, Э. Сеттари. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 416 с.
6. Маскет, М. Физические основы технологии добычи нефти / М. Маскет. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 606 с.

#### REFERENCES

1. Ukraine Ministry of Coal Industry (2005), 10.1.001740088-2005. *Pravila vedeniya gornykh robot na plastakh, sklonnykh k gazodinamicheskim yavleniyam: Normativnyu document Minugleproma 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.
2. Nasedkina, A.A., Nasedkin, A.V. and Iovane, G.A. (2008), “A model for hydrodynamic influence on a multi-layer deformable coal seam”, *Computational Mechanics*, vol. 24, no. 3, pp. 379-389.
3. Bulat, A.F., Krukovskaya, V.V., Krukovskyy, A.P. and Zberovskiy, V.V. (2012), “Numerical Simulation of Hydroimpulsive Impact on Outburst Coal Seam”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 105, pp. 14-25.
4. Bulat, A.F., Krukovskaya, V.V. and Zberovskiy, V.V. (2013), “Comparison of Parameters of Coupled Processes Mode of Massif Deformation Change and Fluid Filtration in Different Modes of Water Infusion in Coal Seams”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 108, pp.197-205.
5. Aziz, H. and Settari, A. (2004), *Matematicheskoe modelirovanie plastovykh sistem* [Petroleum reservoir simulation], Institute of Computer Science, Moscow-Izhevsk, Russia.
6. Masket, M. (2003), *Fizicheskie osnovy tekhnologii dobychi nefti* [Physical principles of oil production], NITS «Regularnay i chaoticheskaya dinamika», Moscow-Izhevsk, Russia.

#### Об авторах

**Круковская Виктория Викторовна**, доктор технических наук, старший научный сотрудник,

старший научний співробітник в відділі Управління динамічними проявленнями горного тиску, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпропетровськ, Україна, [igtm@ukr.net](mailto:igtm@ukr.net).

**Зберовський Василь Владиславович**, кандидат технічних наук, старший научний співробітник, старший научний співробітник в відділі Проблем розриву горних порід, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпропетровськ, Україна.

#### About the author

**Krukovskaya Victoriya Victorovna**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Pressure Dynamics Control in Rocks, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [igtm@ukr.net](mailto:igtm@ukr.net).

**Zberovskiy Vasily Vladislavovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine.

**Анотація.** Запропонований метод імітаційного комп'ютерного моделювання процесів, що відбуваються у вибої гірничої виробки при гідророзпушування вугільного пласта. Цей метод враховує не тільки зміну напруженого стану вуглепородного масиву в результаті розвантаження при проведенні виробки і гідродії, але і участь рідини і газу в процесі утворення розвантаженої області з підвищеною тріщиноватістю. Враховується також залежність зміни абсолютної проникності фільтрації від співвідношення компонент тензора головних напруг у кожній точці досліджуваної області.

Приведено результати чисельного моделювання і розподілу значень геомеханічних і параметрів фільтрації в різні моменти часу гідродії на вугільний пласт у вибої гірничої виробки. Виконані дослідження дозволять удосконалити вибір технологічних параметрів високо-напірного нагнітання рідини, підвищити безпеку ведення гірничих робіт.

**Ключові слова:** імпульсний і статичний режими гідророзпушування вугільного пласта, зв'язані процеси, чисельне моделювання.

**Abstract.** A method for simulating processes occurred in the mine workings at water infusion into the coal seam is proposed. This method takes into account not only the change of the coal-and-rock massif stress state, resulting in pressure relief during the roadway driving and fluid injection but also liquid and gas participation in formation of an unloaded zone with intensive fracturing. Dependence of the absolute filtration permeability on a ratio of principal stress tensor components is taken into account at each point in the study area.

Results of the numerical simulation and distributions of geomechanical and filtration parameters at different time points of the hydrodynamic influence on the coal seam in the working face are shown.

The research will allow improving selection of technological parameters of high-pressure fluid injection, and increasing safety of the mining operations.

**Keywords:** static and pulsed modes of water infusion into the coal seam, coupled processes, numerical simulation.

*Стаття постуила в редакцію 17.08.2015*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.И. Скипочкой*

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  
(ИГТМ 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

---