

Академик НАН Украины А.Ф. Булат,
канд. техн. наук В.В. Круковская,
д-р техн. наук А.П. Круковский,
канд. техн. наук В.В. Зберовский
(ИГТМ НАН Украины)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫБРОСОПАСНЫЕ УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ

Виконано чисельне моделювання зв'язаних нестационарних процесів зміни НДС гірського масиву та двофазної фільтрації рідини і газу з метою дослідження впливу гідроімпульсної дії на вугільний пласт. Наведено розподіли геомеханічних та фільтраційних параметрів під час застосування технології гідроімпульсної дії. Виконано порівняння розрахункових та експериментальних даних.

NUMERICAL SIMULATION OF HYDROIMPULSIVE IMPACT ON OUTBURST COAL SEAM

Numerical modeling of coupled non-stationary processes of change SDS rock massif and two-phase liquid and gas flow in order to investigate the influence of hydroimpulsive impact on the coal seam is executed. The distributions of geo-mechanical and filtration parameters during application of hydroimpulsive impact technology are presented. The comparison of the calculated and experimental data is executed.

Введение и постановка задачи.

В практике ведения горных работ для снижения концентрации напряжений и предотвращения газодинамических явлений применяются различные способы воздействия на краевую часть угленосного массива. Считается, что на неразгруженных горными работами угольных пластах наиболее эффективными являются способы нагнетания жидкости, в частности гидроимпульсное и гидродинамическое воздействие, и бурения опережающих скважин. В условиях больших глубин технология применения этих способов находится в стадиях разработки и совершенствования.

Следует отметить, что несмотря даже на относительно небольшой опыт применения этих способов на глубинах более 900 м, они имеют высокую эффективность. Вместе с тем, при принятии новых технических решений для обоснования рациональных технологических параметров в конкретных горно-геологических условиях, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Повысить надежность и обоснованность принятия таких решений возможно с помощью имитационного моделирования технологических процессов и процессов, происходящих в забое горной выработки при гидроимпульсном воздействии. Для их теоретического описания необходимо объединить в единую связанную систему следующие дифференциальные уравнения, описывающие изменение во времени параметров:

- напряженного состояния угленосного 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 зависимости от напряженно деформированного состояния (НДС) массива.

Аналитическое решение задачи в такой постановке невозможно из-за ее сложности. Существующие решения ограничены множеством допущений и не учитывают наличие в геосистеме воды и газа.

Решение частных задач при гидроимпульсном воздействии было рассмотрено в работах [1-4]. В работе [1] рассмотрена аналитическая модель расчета параметров гидроимпульсного воздействия с учетом сопротивляемости угля сдвигу, в работах [2, 3] приведен расчет радиальных напряжений вокруг скважины и передачи давления в угольный пласт. В работе [4] рассмотрена физическая модель предельного состояния выбросоопасного угольного пласта в его краевой части при различных режимах нагнетания жидкости. Однако в данных работах не рассматриваются процессы изменения НДС горного массива во времени, трещинообразования, фильтрации жидкости и газа, то есть те процессы, которые приводят к развитию области гидроимпульсного воздействия. Кроме этого, аналитические модели расчета параметров гидроимпульсного воздействия [1-3], достаточные для описания физической модели [4], не позволяют описать многообразие взаимных связей между процессами изменения НДС горного массива, развития области фильтрации и движения в ней воды и метана в прискважинной зоне при нагнетании жидкости и после нагнетания при дегазации угольного пласта.

Численные методы предоставляют гораздо большую свободу при моделировании реальных процессов. Например, авторы [5, 6] 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, необходимо отметить, что наличие в трещинно-поровом пространстве метана и зависимость фильтрационной проницаемости твердой фазы от ее напряженного состояния являются важными факторами. Без их учета невозможно адекватно отобразить многообразие физических процессов, происходящих при гидроимпульсном воздействии на газонасыщенный угольный пласт.

Целью данной работы является разработка численной модели протекания связанных процессов изменения НДС массива, фильтрации жидкости и газа при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт и после него, определение размеров области гидровоздействия и параметров её дегазации.

Исходя из горно-геологических условий залегания пласта i_3^1 и параметров гидрорыхления, применяемого на шахтах ПАО «Краснодонуголь» [7], принято: глубина – $H=1000$ м; мощность пласта $m=1,5$ м; природная газоносность пласта $x=20$ м³/т; глубина бурения технологических скважин 6,0 м; глубина герметизации $l_c=4,0$ м.

Технология гидрорыхления (с параметрами, принятыми для этого расчета) на угольный пласт состоит из следующих этапов:

- 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;
- подвигание забоя на 3,0 м;
- бурение контрольных шпуров и замер начальной скорости газовыделения до глубины 3,0 м.

1. Математическая модель связанных нестационарных процессов изменения НДС горного массива и двухфазной фильтрации жидкости и газа.

При использовании численных методов сплошная среда аппроксимируется дискретной моделью. С усилением дискретизации поведение дискретной системы приближается к поведению «непрерывной системы» – сплошной среды. Исследуемая область разбивается на N треугольных конечных элементов с узлами x_j^i, y_j^i , где i изменяется в пределах от 1 до 3, j – от 1 до N . Рассмотрим системы уравнений, которыми описываются процессы изменения НДС горного массива и двухфазной фильтрации жидкости и газа.

Изменение во времени напряженно-деформированного состояния породного массива описывается соотношениями:

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

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

Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора, которое учитывает возможность возникновения разрушения, как в результате сдвига, так и в результате отрыва. Таким образом, принимается во внимание то, что горные породы имеют различные пределы прочности на сжатие и на растяжение.

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 $[C_s]$ – матрица демпфирования; $\{U\}$ – вектор узловых перемещений; $[K_s]$ – матрица жесткости твердого тела; $\{F_s\}$ – вектор усилий в узлах. Причем в каждом конечном элементе матрица демпфирования задается соотношениями:

$$c_{ij} = \int_V N_i \mu_s N_j. \quad (3)$$

Нестационарная фильтрация газа в плоской постановке при наличии источника газовой выделенности описывается уравнением:

$$\mu_g \frac{\partial p}{\partial t} = K_g \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q_g(t); \quad (4)$$

где p – давление газа; K_g – коэффициент проницаемости; μ_g – вязкость газа; q_g – интенсивность источников газовой выделенности.

Путем минимизации функционала уравнение (4) может быть преобразовано к виду:

$$[C_g] \frac{\partial \{P\}}{\partial t} + [K_g] \{P\} + \{F_g\} = 0, \quad (5)$$

где $[C_g]$ – матрица демпфирования; $\{P\}$ – вектор давления газа; $[K_g]$ – матрица газовой проницаемости элемента; $\{F_g\}$ – вектор поглощения (выделения) газа.

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

$$\mu_w \frac{\partial s}{\partial t} = K_w \left(\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} \right) + q_w(t); \quad (6)$$

где μ_w – вязкость жидкости; s – концентрация жидкости, насыщенность жидкостью трещинно-порового пространства; K_w – коэффициент проницаемости для жидкости; q_w – интенсивность источников выделения.

Уравнение (6) можно записать в матричном виде:

$$[C_w] \frac{\partial \{S\}}{\partial t} + [K_w] \{S\} + \{F_w\} = 0, \quad (7)$$

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

Матрица демпфирования в этом случае вычисляется в элементах по соотношениям, аналогичным (3).

Решения дифференциальных уравнений (2), (5) и (7) на определенном временном промежутке получаем с помощью конечно-разностного метода, когда для достаточно малых значений Δt эти уравнения преобразовываются к виду:

$$\begin{aligned} \left([K_s] + \frac{2}{\Delta t} [C_s] \right) \{U\}_{t+\Delta t} &= \left(\frac{2}{\Delta t} [C_s] - [K_s] \right) \{U\}_t - (\{F_s\}_t + \{F_s\}_{t+\Delta t}); \\ \left([K_g] + \frac{2}{\Delta t} [C_g] \right) \{P\}_{t+\Delta t} &= \left(\frac{2}{\Delta t} [C_g] - [K_g] \right) \{P\}_t - (\{F_g\}_t + \{F_g\}_{t+\Delta t}); \\ \left([K_w] + \frac{2}{\Delta t} [C_w] \right) \{S\}_{t+\Delta t} &= \left(\frac{2}{\Delta t} [C_w] - [K_w] \right) \{S\}_t - (\{F_w\}_t + \{F_w\}_{t+\Delta t}). \end{aligned}$$

В то время как для описания однофазной фильтрации достаточно единственной зависимой переменной p или s , для многофазной фильтрации нужны обе переменные и дополнительные соотношения [8]:

$$\begin{aligned} P_c &= p_g - p_w = f(S_w); \\ S_w + S_g &= 1; \end{aligned} \tag{8}$$

где ϕ – пористость твердой фазы; 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 напряженного состояния, абсолютную проницаемость. Абсолютная проницаемость рассматривается как величина, характеризующая фильтрационную способность твердой фазы, где подвижная фаза занимает все свободное пространство. Когда в трещинно-пористой среде присутствуют несколько подвижных фаз, термин «проницаемость» должен быть связан с каждой отдельной фазой. Фазовую, относительную, проницаемость удобно выразить в долях абсолютной проницаемости K [9]:

$$K = K_w + K_g = 100\% .$$

Физическая абсолютная проницаемость не зависит от природы жидкости, пока последняя не взаимодействует с пористой средой. Это может быть либо химическое взаимодействие, либо физическое, когда часть жидкой фазы смачивает внутренние твердые стенки трещинно-порового пространства и стремится концентрироваться в капиллярах и в микротрещинах, что уменьшает общую проницаемость. В этом случае часть жидкости составляет неподвижную фазу, объем которой зависит от свойства жидкости смачивать породу. Тогда относительная проницаемость для подвижной жидкой фазы K_g^n будет равна:

$$K_g^n = K - K_w - K_g^0,$$

где K_g^0 – доля объема трещинно-порового пространства, занятого неподвижной жидкой фазой.

При расчетах будем полагать, что газ не растворяется в воде; вода – смачивающая фаза. Зависимость фильтрационной проницаемости от соотношения компонент тензора главных напряжений, учитывающую тот факт, что проницаемость горных пород возрастает только в том случае, когда их деформирование происходит с увеличением объема, возьмем из [10].

2. Решение задачи

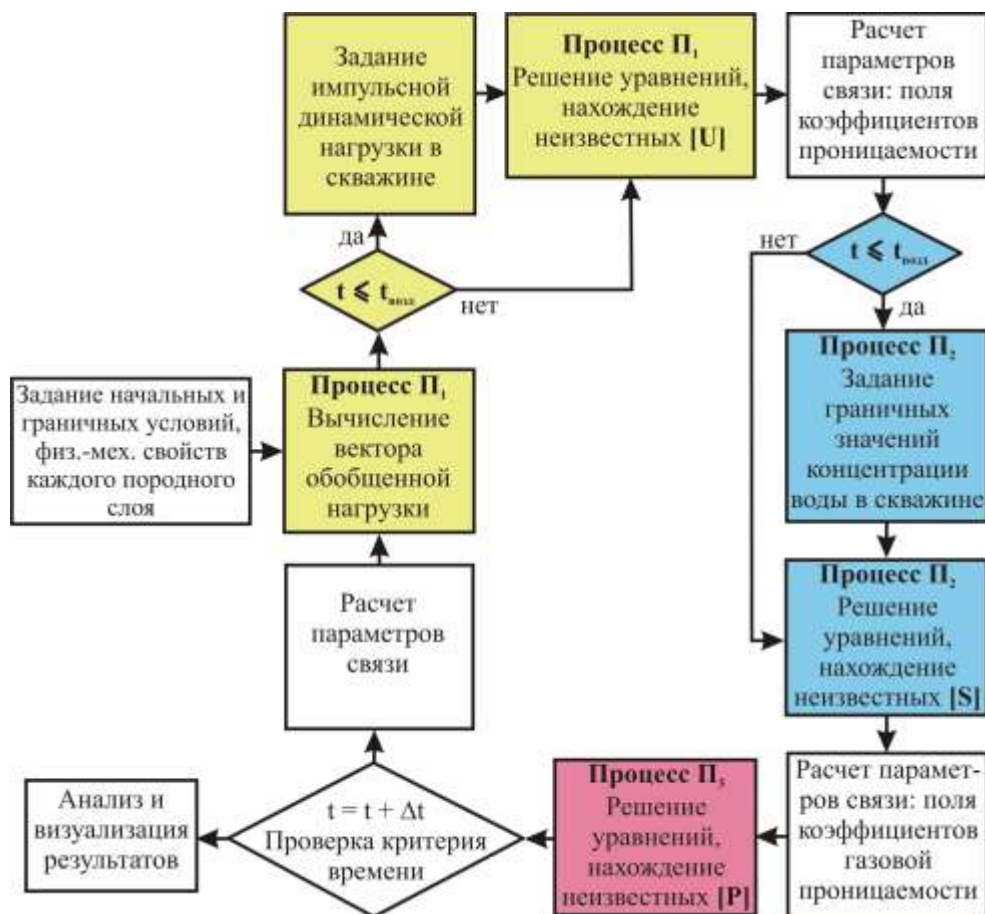
Решение проводится по следующей схеме. На каждой временной итерации рассчитывается:

- поле напряжений σ_{ij} ;
- поле коэффициентов проницаемости $K(\sigma_{ij})$ в зависимости от параметров напряженного состояния угольного пласта и горной породы;
- область гидрорыхления при статическом или импульсном нагнетании жидкости (область фильтрации воды из скважины, определяемая через насыщенность трещинно-порового пространства водой S_w);
- поле коэффициентов газовой проницаемости $K_g = K(\sigma_{ij}) - S_w$;
- параметры фильтрации метана.

На рис. 1 приведен пример блок-схемы решения задачи при гидроимпульсном воздействии.

Моделирование гидрорыхления в импульсном режиме осуществляется посредством приложения соответствующей нагрузки в узлах незагерметизированной части скважины в начале расчета на временных итерациях $i=1$, $i=3$ и $i=5$. На шестой итерации прекращается нагнетание жидкости в скважину, после чего, на 10-й итерации, происходит подвигание забоя, затем начинается замер начальной скорости газовыделения из контрольного шпура.

Начальные и граничные условия для данной задачи приведены в табл. 1, в которой приняты обозначения: γ – удельный вес вышележащих горных пород; λ – коэффициент бокового распора; Ω_1 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура; Ω_3 – контур шпура; γ_e – плотность воды; $\Omega_4(t)$ – изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_5 – внутренний контур (выработка).



Процесс П₁ – изменение НДС горного массива; процесс П₂ – фильтрация жидкости; процесс П₃ – фильтрация метана; $t_{\text{возд}}$ – время гидрорыхления пласта

Рис. 1 – Блок-схема решения задачи

Таблица 1 – Начальные и граничные условия для рассматриваемых связанных процессов

	П ₁	П ₂	П ₃
Начальные условия	$\sigma_{yy} _{t=0} = \gamma H$ $\sigma_{xx} _{t=0} = \lambda \gamma H$ $\sigma_{zz} _{t=0} = \lambda \gamma H$	$s _{t=0} = 0$	$p _{t=0} = p_0$ $p_0 = 0,8 * \gamma_6 H$
Граничные условия	$u_x _{\Omega_1} = 0$ $u_y _{\Omega_2} = 0$	$s _{\Omega_3} = 100\%$	$p _{\Omega_4(t)} = p_0$ $p _{\Omega_5} = 0,1 \text{ МПа}$

3. Результаты расчета.

На рис. 2 показаны распределения значений геомеханического параметра $Q = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$, характеризующего степень разнокомпонентности поля напряжений. Как видно из рисунков, область повышенной разнокомпонентности ($0,4 < Q < 0,8$) вокруг скважины увеличивается со временем. При гидроимпульсном воздействии вокруг незагерметизированной части скважины на 1-5 итера-

циях образуется обширная область неупругих деформаций, которая далее остается практически неизменной.

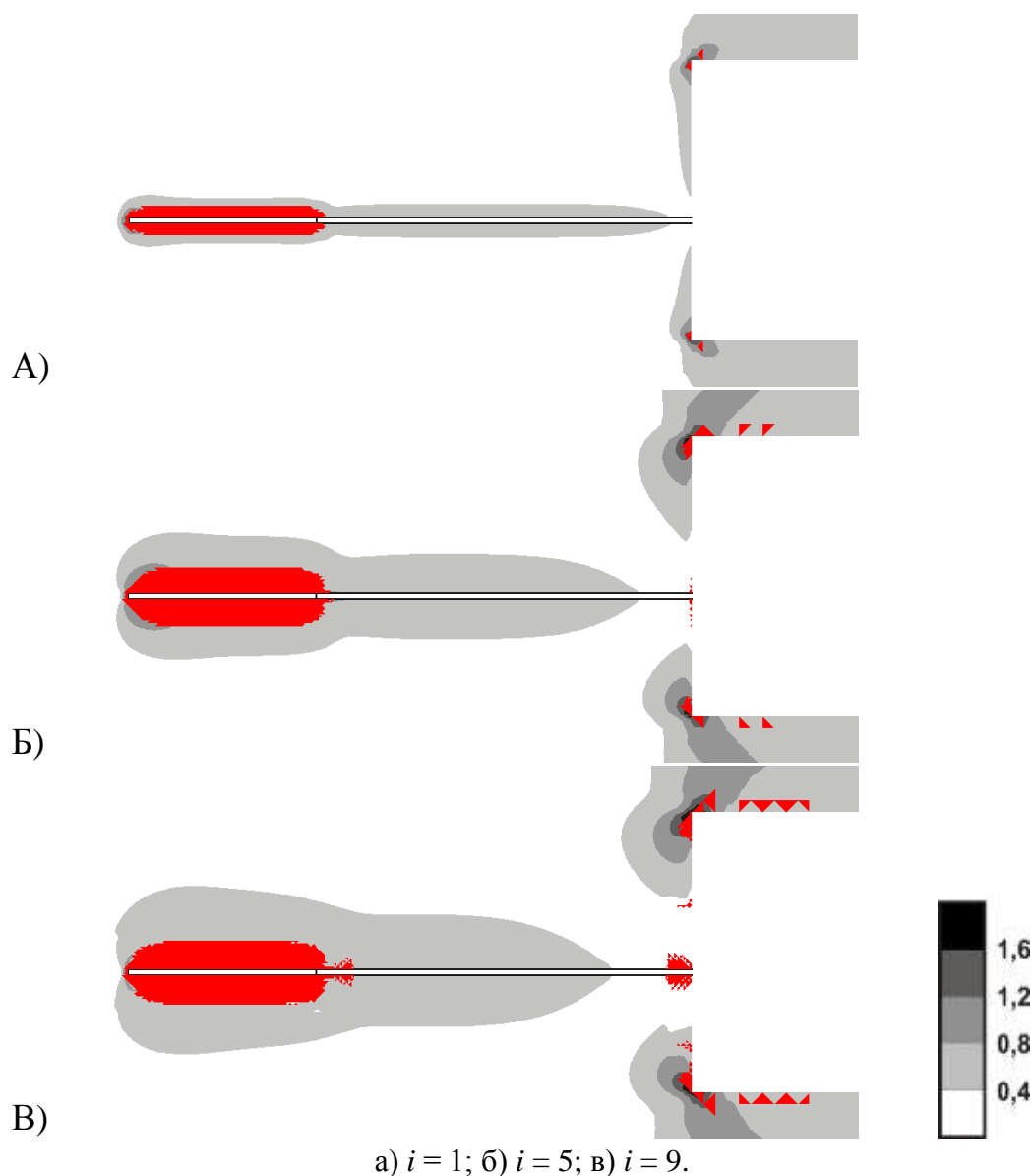


Рис. 2 – Распределения значений параметра Q , зоны неупругих деформаций при гидроимпульсном воздействии в различные моменты времени

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. 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 гидроразрыхления пласта.

На рис. 3 приведены линии уровня насыщенности порового пространства водой в различные моменты времени импульсного нагнетания жидкости. Результаты моделирования гидроимпульсного воздействия можно интерпретировать следующим образом. Область воздействия жидкостью на угольный пласт охватывает в основном незагерметизированную часть скважины и имеет около

0,8 м в диаметре. При прекращении нагнетания жидкости, начиная с 6-й временной итерации, значения водонасыщенности трещинно-порового пространства s в области фильтрации начинают снижаться. К 10-й итерации они падают до 5 % в отдельных областях и ниже, рис. 3г.

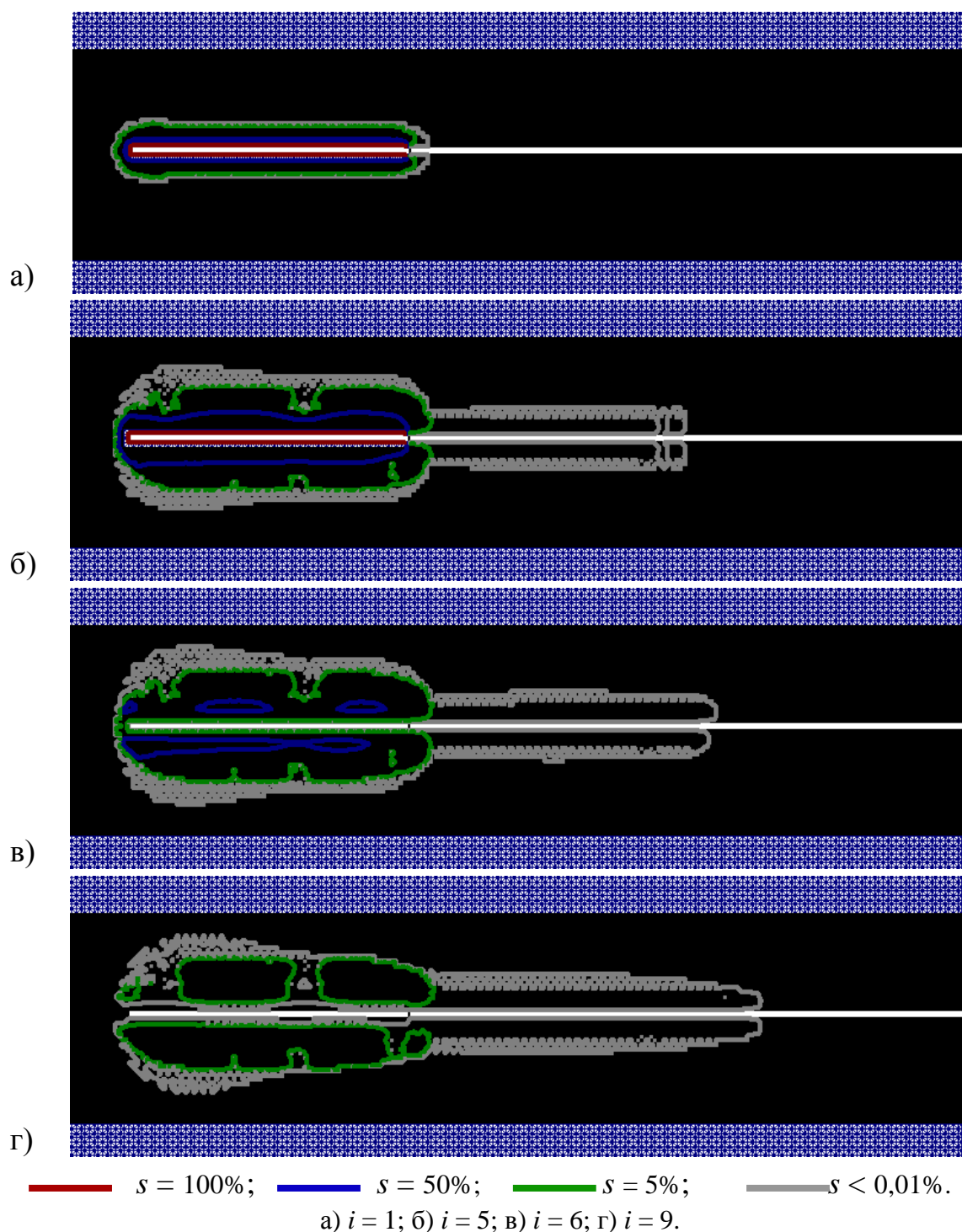
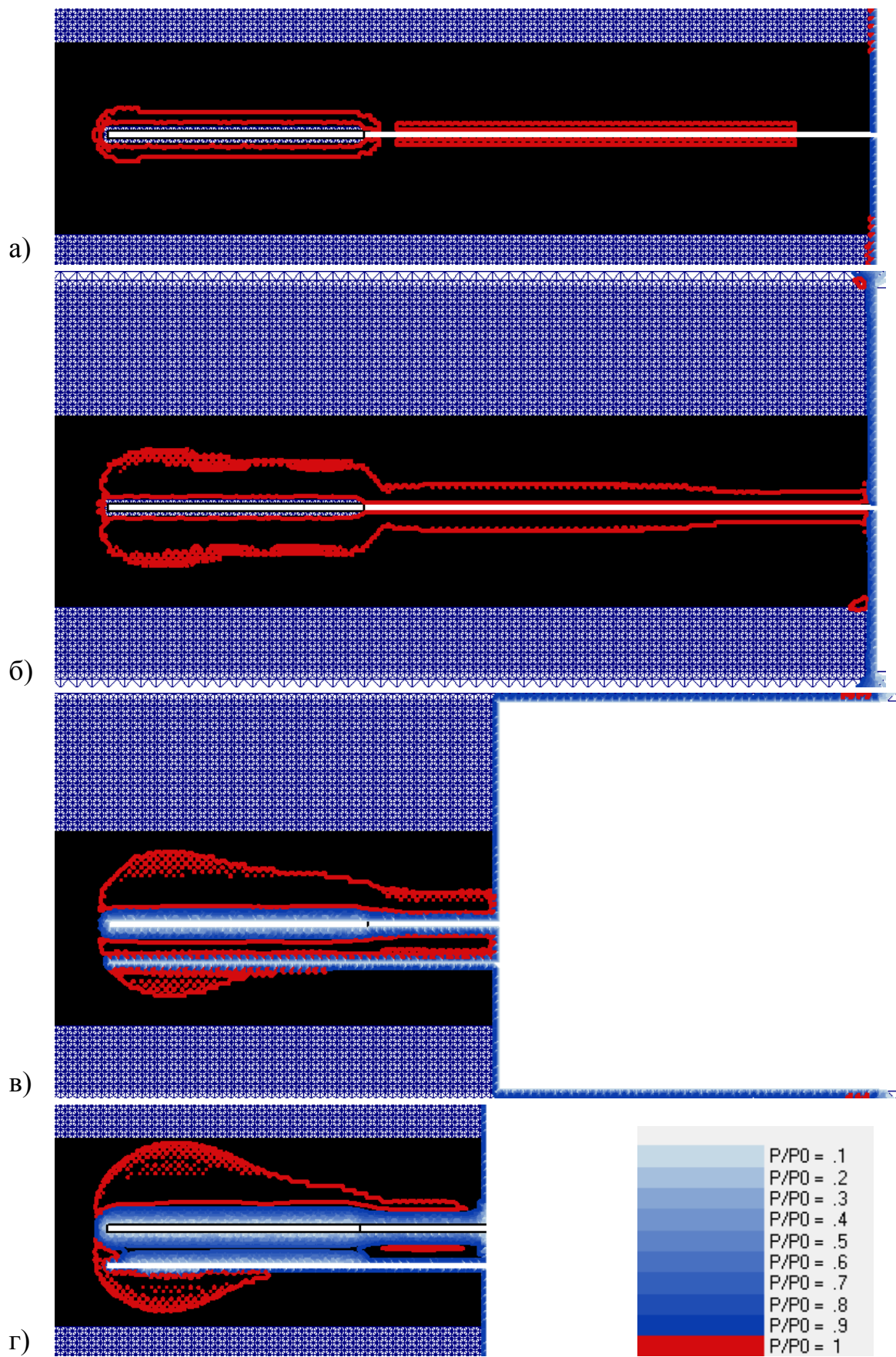


Рис. 3 – Распределение изолиний насыщенности порового пространства водой вокруг скважины

Область фильтрации газа и дегазации пласта можно рассмотреть по изменению давления газа вокруг скважины. Изобары давления метана в различные моменты времени показаны на рис. 4.



а) $i = 1$; б) $i = 5$; в) $i = 10$; г) $i = 25$.

Рис. 4 – Изобары относительного давления метана в различные моменты времени при гидрорыхлении пласта и гидроимпульсном воздействии на пласт

На первых временных итерациях, закачиваемая жидкость перемещается вглубь пласта (рис. 3а, б), оттесняя и сжимая метан. 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. Мелкие трещины и поры при этом еще закрыты смачивающей фазой воды, поэтому отток метана из них затруднен. На 10-й временной итерации, рис. 4в, происходит подвигание забоя выработки на 3,0 м и бурится контрольный шпур. Фильтрация метана в угольном пласте продолжается, область, подвергшаяся гидровоздействию, постепенно дегазируется, 4г.

Для оценки достоверности решения задачи по предложенной блок-схеме численного моделирования (рис.1) сравним скорость выделения метана из контрольных шпуров с фактическими данными начальной скорости газовыделения, полученными в 24-ом восточном конвейерном штреке пласта i_3^1 гор. 915 м ш/у «Суходольское-Восточное», рис. 5.

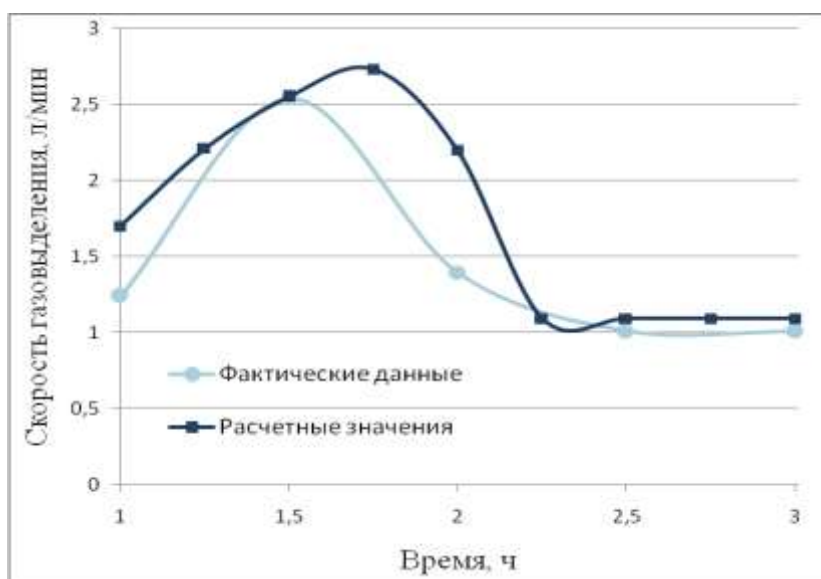


Рис. 5 – Изменение начальной скорости газовыделения из шпуров при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт

По сопоставлению расчетных и фактических данных можно отметить, что моделирование выполнено с достаточно высокой точностью.

Выводы.

Приведенные результаты численного моделирования связанных нестационарных процессов изменения НДС горного массива и двухфазной фильтрации жидкости и газа, протекающих при гидрорыхлении выбросоопасных угольных пластов в режиме импульсного нагнетания жидкости позволяют сформулировать следующие выводы.

Разработанная математическая модель учитывает изменение напряженного состояния вмещающего выработку массива как под действием веса вышележащих пород, так и при изменении давления газа и жидкости, находящихся в трещинно-поровом пространстве. Проницаемость всего массива и в том числе

угольного пласта в забое выработки рассчитывается в зависимости от соотношения компонент тензора главных напряжений. Таким образом учитывается роль геомеханических факторов, воздействия воды и газа в процессе образования области фильтрации при достижении основной цели метода гидроимпульсного воздействия – увеличении зоны равномерного гидрорыхления пласта.

Достаточно высокая точность моделирования, установленная при сопоставлении расчетных и фактических данных, позволяет рекомендовать данный метод расчета при разработке технологических схем и параметров гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов на больших глубинах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зберовский В.В. Предельное состояние выбросоопасных угольных пластов при их гидрорыхлении с учетом сопротивляемости угля сдвигу / В.В. Зберовский, Ю.А. Костандов // Збірник наукових праць НГУ України. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – № 36. – Том № 2. – С. 36-43.
2. Исследование радиальных напряжений вокруг скважины при гидроимпульсном рыхлении угольных пластов / А.Р. Сницер, В.В. Зберовский, Д.Л. Васильев [и др.] // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 2011. – № 95. – С.43-53.
3. Передача давления в угольный пласт при гидроимпульсном нагнетании жидкости в скважину / А.Р. Сницер, Л.М. Васильев, В.В. Зберовский, И.Ф. Чугунков // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 2012. – № 104. – С.52-61.
4. Модель предельного состояния угольного пласта при нагнетании жидкости / В.В. Зберовский, Ю.Е. Поляков, А.В. Пазынич [и др.] // Збірник наукових праць НГУ України. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – № 36, Том № 1. – С. 194-199.
5. Наседкина А.А. Конечно-элементное моделирование процесса гидродинамического расчленения многослойного угольного пласта / А.А. Наседкина, В.Н. Труфанов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых - 2006. – №1. – С. 61-70.
6. 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.
7. Оценка эффективности гидроимпульсного воздействия по газовому фактору в забоях подготовительных выработок / В.В. Зберовский, А.В. Пазынич, Ю.Е. Поляков [и др.] // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 2010. – № 89. – С.126-133.
8. Азиз Х. Математическое моделирование пластовых систем / Х. Азиз, Э. Сеттари. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 416 с.
9. Маскет М. Физические основы технологии добычи нефти. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 606 с.
10. Круковская В.В. Разработка метода расчета параметров процесса фильтрации метана с учетом напряженно-деформированного состояния подрабатываемого углепородного массива [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.15.11 : защищена 3.11.06 : утв. 14.12.06 / Круковская Виктория Викторовна. – Днепропетровск, 2006. – 134 с. – Библиогр.: с. 124-134.

**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ
НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ ОБРАБОТКИ ГОРНОГО МАССИВА
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

Стаття представляє концепцію механізму перерозподілу напруги при гідродинамічній дії на напружений газонасичений гірський масив через свердловину з витяганням вугілля і газу і створення за рахунок цього вторинної пористості в оброблюваній дією зоні.

**PHENOMENOLOGICAL MODEL OF THE STRESS REDISTRIBUTION
IN THE PROCESSING ZONE OF ROCK MASS HYDRODYNAMIC
INFLUENCE**

The article introduces the concept of the mechanism of stress redistribution under hydrodynamic influence on the tense gas-saturated rock mass through the borehole with the extraction of coal and gas and formation at the expense of secondary porosity in the processed area.

Известны различные теории перераспределения напряжений вокруг выработок в горном массиве, но до настоящего времени нет однозначной концепции его самоорганизации, как природного явления.

Предлагаемая концепция базируется на законе сохранения энергии и учитывает энергию сжатой породы в процессе перераспределения напряжений в зоне обработки горного массива гидродинамическим воздействием при образовании в ней вторичной пористости и не высвободившуюся энергию сжатой породы, стремящуюся восстановить свой объем вокруг зоны образования вторичной пористости.

Результаты исследований взаимодействия гидродинамического воздействия с напряженным газонасыщенным массивом, проведенных ИГТМ НАН Украины на шахтах Донбасса, явились основой научных открытий №123, №184 и №228 [1-3].

При подаче воды в скважину под давлением она, проникая по трещинам разгруженной зоны, создает объемное давление на каждый фрагмент породы и, в определенной степени, выравнивает напряжения в ней вплоть до зоны опорного давления и создает волну давления (нагрузки).

При сбросе давления воды в скважине она за счет разности давления фильтрует в направлении центра скважины, увлекая за собой фрагменты угля, которые образовались за счет резкого сброса давления. В зоне опорного давления за счет обратной волны разгрузки происходит дезинтеграция угля по типу образования разгруженной зоны вокруг скважины.

Таким образом, после сброса давления воды в скважине она увлекает за собой фрагменты угля, а разрушенные фрагменты заполняют пространство вынесенных и происходит поочередное смещение их к центру скважины, зона разгрузки расширяется, а зона опорного давления отодвигается вглубь массива.

При повторных циклах уголь в скважине постоянно дезинтегрируется и постепенно заполняет мелкоизмельченным углем значительный объем простран-