

УДК 622.831.322

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

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
ПРОВЕДЕНИИ ПРОТИВОВЫБРОСНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ**

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

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗВ'ЯЗАНИХ
ГЕОМЕХАНІЧНИХ І ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ
ПРОТИВВИКИДНИХ ЗАХОДІВ**

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

**MATHEMATICAL SIMULATION OF INTERCONNECTED
GEOMECHANICAL AND FILTRATION PROCESSES WHILE REALIZING
MEASURES ON OUTBURST PREVENTION**

Аннотация. Протекание газодинамических процессов в углепородном массиве тесно связано с технологическими факторами. Исследование и установление закономерностей протекания газодинамических процессов при различных технологических воздействиях имеет большое значение для научного обоснования параметров различных способов их предотвращения, повышения эффективности и безопасности угледобычи.

Для моделирования применения разгрузочных щелей, опережающих скважин, надработки и подработки угольных пластов, для исследования влияния скорости проведения выработки на развязывание ГДЯ разработана математическая модель «изменение НДС углепородного массива – нестационарная фильтрация метана – десорбция метана». Для моделирования увлажнения и гидровоздействия на угольный пласт – модель «изменение НДС углепородного массива – нестационарная двухфазная фильтрация жидкости и газа – десорбция метана». Для моделирования торпедирования угольного массива и пород кровли пласта, проходки выработки в режиме сотрясательного взрывания разработана математическая модель «изменение НДС углепородного массива – нестационарная фильтрация метана – десорбция метана – взрывное воздействие». Разработаны алгоритмы решения перечисленных связанных задач. Новизна предложенного подхода заключается в возможности исследования нескольких физических и технологических процессов одновременно с учетом их взаимного влияния.

Ключевые слова: моделирование связанных процессов, газодинамические явления, способы предупреждения газодинамических явлений.

Введение. Протекание фильтрационных и геомеханических процессов в углепородном массиве тесно связано с технологическими факторами. Одни из них способствуют развязыванию динамических процессов, другие – снижают выбороопасность угольных пластов. В настоящее время существуют различные способы предотвращения ГДЯ [1]: надработка и подработка угольных пластов; увлажнение; передовое торпедирование пород кровли пласта; гидро-

динамическое воздействие на пласт; гидрорыхление и гидроотжим; применение разгрузочных щелей; бурение опережающих (разгрузочных и дегазационных) скважин; торпедирование угольного массива. Но существуют технологические воздействия, которые оказывают обратное влияние на возникновение выбросоопасной ситуации: повышение скорости проходки, ведение буровзрывных работ, и т.д.

Исследование и установление закономерностей протекания газодинамических процессов при различных технологических воздействиях имеет большое значение для научного обоснования параметров различных способов их предотвращения, повышения эффективности и безопасности угледобычи. Такие исследования невозможны без применения методов численного моделирования, позволяющего с высокой степенью достоверности имитировать взаимодействие во времени силовых, деформационных и фильтрационных полей [2-4]. Поэтому целью данной работы является создание математических моделей нестационарных газодинамических процессов, происходящих в забое горной выработки при различных технологических воздействиях, для исследования способов снижения выбросоопасности.

Математическое моделирование связанных процессов при разгрузке углепородного массива от горного давления. Для моделирования применения разгрузочных щелей, опережающих скважин, надработки и подработки угольных пластов, исследования влияния скорости проведения выработки на развязывание ГДЯ необходима математическая модель связанных процессов изменения НДС углепородного массива, нестационарной фильтрации и десорбции метана.

При разгрузке газонасыщенного углепородного массива от горного давления в нем протекают процессы перераспределения поля напряжений, фильтрации и десорбции газа в нарушенной области горных пород (области фильтрации). Поэтому математическая модель связанных процессов при разгрузке углепородного массива от горного давления должна включать уравнения изменения НДС твердого тела, нестационарной фильтрации и десорбции газа.

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + X_i(t) + P_i(t) = c_g \frac{\partial}{\partial t} u_i; \\ \frac{\partial p}{\partial t} + K \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q(t) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y , МПа/м; $X_i(t)$ – проекции внешних сил, действующих на единицу объема тела, Н/м³; $P_i(t)$ – проекции сил, обусловленных давлением газа в трещинно-поровом пространстве, Н/м³; u_i – перемещения, м; c_g – коэффициент демпфирования, Нс/м; p – давление газа, МПа; K – поле фильтрационной проницаемости массива, мДа; $q(t)$ – функция газовыделения (десорбции) метана, t – время, с.

Задача решается в упруго-пластической постановке. 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.

Газ перемещается в трещинно-поровом пространстве твердого тела, имеющего определенную, зависящую от соотношения компонент тензора главных напряжений, проницаемость. Ранее было показано [5], что

$$\left\{ \begin{array}{l} k = 0 \text{ при } Q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H} < 0,6; \\ k = 0 \text{ при } Q < 0,7; P = \frac{\sigma_3}{\gamma H} > 0,25; \\ k = k_{\min} \text{ при } 0,7 < Q < 0,8; \\ k = e^{0,26Q - 4,65} \text{ при } Q > 0,8; P > 0,1; \\ k = k_{\max} \text{ при } Q > 0,8; P < 0,1, \end{array} \right. \quad (2)$$

где σ_1, σ_3 – максимальная и минимальная компоненты тензора главных напряжений, МПа; γ – усредненный вес вышележащих горных пород, Н/м³; H – глубина разработки, м.

При малых скоростях фильтрации флюидов движение потока подчиняется закону Дарси

$$v_x = k \frac{\partial p}{\partial x}; \quad v_y = k \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (3)$$

где v_x, v_y – компоненты вектора скорости фильтрации, м/мин.

При изучении некоторых динамических процессов, например выброса угля и газа или взрывного воздействия, в некоторые моменты времени скорость может и не удовлетворять этому условию. В этом случае необходимо учитывать зависимость между градиентом давления и более высокими степенями скоростей фильтрации [6]. Такие законы получены авторами [7, 8], их можно записать в виде (3) [6], если $K = f(\bar{v})$.

Начальные условия для поставленной задачи:

$$\begin{array}{l} \sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H; \\ \sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H; \end{array} \quad p|_{t=0} = p_0,$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, МПа; λ – коэффициент бокового распора; p_0 – давление метана в нетронутым массиве.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} u_x|_{\Omega_1} &= 0; & p|_{\Omega_3(t)} &= p_0; \\ u_y|_{\Omega_2} &= 0; & p|_{\Omega_4} &= 0,1 \text{ МПа}; \end{aligned}$$

где Ω_1 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура; $\Omega_3(t)$ – изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_4 – внутренний контур (выработка).

При решении поставленной задачи на каждой временной итерации получим поля напряжений, зоны неупругих деформаций, поля коэффициентов проницаемости, давления метана и скоростей его фильтрации. Расчет параметров деформирования и фильтрации метана при разгрузке углепородного массива от горного давления был выполнен при решении задач:

- моделирования процесса выброса угля и газа при бурении опережающих скважин в забое выработки [9];
- моделирования действия разгрузочных полостей для предотвращения газодинамических явлений в забое подготовительной выработки [10, 11];
- определения влияния глубины внедрения в выбросоопасную зону на протекание газодинамических процессов вблизи тектонических нарушений [12].

Математическое моделирование связанных процессов при гидровоздействии на угольный пласт. Для моделирования гидровоздействия на угольный пласт необходима математическая модель «изменение НДС углепородного массива – нестационарная двухфазная фильтрация жидкости и газа – десорбция метана».

Горный массив на больших глубинах практически не обладает фильтрационной проницаемостью. Но при проходке выработки и бурении скважины в ее забое происходит перераспределение поля напряжений, связанное с разгрузкой вмещающего массива от горного давления. Вокруг образованных полостей развивается система трещин, образуя область фильтрационной проницаемости, в которой под действием перепада давлений метан движется из глубины угольного массива в скважину.

Во время гидровоздействия закачиваемая в скважину жидкость перемещается вглубь пласта, отесняя метан. При достаточно высоком давлении воды, при размокании пород происходит увеличение трещиноватости и расширение области фильтрации (области гидровоздействия). Влага проникает далеко вглубь пласта, смачивая внутреннюю поверхность трещинно-порового пространства и перекрывая мелкие трещины для движения газа. После сброса давления жидкости в скважине большая часть воды уходит и вновь начинается процесс фильтрации метана в расширившейся области фильтрации вокруг незагерметизированной части скважины.

Таким образом, для моделирования геомеханических и фильтрационных процессов при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт 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 во времени

границы области фильтрации и проницаемости внутри нее. Для описания многофазной фильтрации нужны две переменные: давление p и насыщенность s [13]:

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + X_i(t) + P_i(t) = c_g \frac{\partial}{\partial t} u_i; \\ \frac{\partial p_g}{\partial t} + k_g \left(\frac{\partial^2 p_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_g}{\partial y^2} \right) + q_g(t) = 0; \\ \frac{\partial s_w}{\partial t} + k_w \left(\frac{\partial^2 s_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s_w}{\partial y^2} \right) = 0; \\ s_w + s_g = 1; \\ k = k_w + k_g, \end{cases} \quad (4)$$

где индексы «w» и «g» обозначают соответственно жидкую и газообразную фазы; s – насыщенность трещинно-порового пространства водой и газом; P – давление в трещинно-поровом пространстве, МПа.

Абсолютная проницаемость k рассматривается как величина, характеризующая фильтрационную способность твердой фазы, где подвижная фаза занимает все свободное пространство. Абсолютная проницаемость зависит от соотношения компонент тензора главных напряжений (2). Фазовая проницаемость k_w и k_g выражается в долях абсолютной проницаемости [13].

Моделирование гидровоздействия в импульсном или статическом режиме осуществляется посредством приложения соответствующей нагрузки в узлах незагерметизированной части скважины на нужных временных итерациях.

Начальные условия для поставленной задачи:

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma H; & p|_{t=0} &= p_0; \\ \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma H; & s|_{t=0} &= s_0, \end{aligned}$$

где s_0 – насыщенность водой трещинно-порового пространства в нетронутом массиве.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} u_x|_{\Omega_1} &= 0; & p|_{\Omega_3(t)} &= p_0; & s|_{\Omega_5} &= 100\%, \\ u_y|_{\Omega_2} &= 0; & p|_{\Omega_4} &= p_v; \quad p_v = 0,1 \text{ МПа}; \end{aligned}$$

где Ω_5 – контур скважины.

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;

- насыщенность трещинно-порового пространства водой s_w и область гидро-воздействия (область фильтрации воды);

- поле коэффициентов газовой проницаемости $k_g = k(\sigma_{ij}) - s_w$;

- параметры фильтрации метана.

Расчет параметров деформирования, фильтрации воды и метана был выполнен при решении задач о нагнетании воды в угольный пласт [14, 15].

Математическое моделирование связанных процессов при взрывном воздействии. Для моделирования торпедирования угольного массива или кровли пласта, проходки выработки при помощи сотрясательного взрывания необходима модель «изменение НДС углепородного массива – нестационарная фильтрация метана – десорбция метана – взрывное воздействие».

В момент взрывания шпуровых зарядов в забое выработки в массиве начинает распространяться волна сжатия, накладывая на существующее поле напряжений σ_{ij} дополнительные напряжения σ^e_{ij} вызванные взрывом. Для расчета компонент тензора напряжений $\sigma^e_{ij}(x, y, t)$ можно использовать зависимости, полученные на основании лабораторных и натуральных экспериментальных данных [16].

В результате практических и экспериментальных исследований [17] установлено, что «процесс разрушения горных пород взрывом характеризуется одним видом разрушения – отрывом под действием растягивающих напряжений. При этом энергия взрывчатого превращения ВВ ... состоит из энергии волн напряжения и давления газообразных продуктов детонации. Роль энергии волны напряжения заключается в том, что при распространении она частично нарушает массив по системе естественных микротрещин в объеме до 75% общего разрушения, а при последующем расширении продуктов детонации они своим давлением расширяют образовавшиеся трещины до полного разрушения породы». Поэтому при моделировании взрывного воздействия необходимо учитывать и изменения напряженного состояния породного массива и участие газообразных продуктов детонации в процессе разрушения.

Таким образом, напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки при взрывании зарядов ВВ и движение газа в нарушенном массиве будем описывать системой уравнений:

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + X_i(t) + Y_i(t) + P(t) = c_g \frac{\partial}{\partial t} u_i + \rho \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right); \\ K = f(t, \sigma_{ij}, \bar{v}); \\ \mu_2 \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q(t) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $Y_i(t)$ – проекции сил, обусловленных действием взрыва, Н/м³; ρ – плотность породы, угля, кг/м³.

Когда волна сжатия подходит к открытой поверхности забоя, она отражается

от нее, превращаясь в волну растяжения, центром которой является точка, симметричная центру взрыва относительно поверхности забоя.

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma H; & u_x|_{\Omega_1} &= 0; \\ \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma H; & u_y|_{\Omega_2} &= 0; \\ p|_{t=0} &= p_0; & p|_{\Omega_3(t)} &= p_0; \\ p|_{t=t_{взр}, x=x_{взр}, y=y_{взр}} &= \frac{p_d}{2}; & p|_{\Omega_4} &= 0,1 \text{ МПа}; \end{aligned}$$

где $t_{взр}$ – момент взрыва, с; $x_{взр}$, $y_{взр}$ – координаты центра взрыва, м; p_d – детонационное давление [18].

При решении поставленной задачи на каждой временной итерации, до и после момента $t_{взр}$ взрывания шпуровых зарядов, получим поля напряжений, зоны неупругих деформаций, поля коэффициентов проницаемости, давления метана и скоростей его фильтрации. Расчет параметров деформирования углепородного массива и фильтрации метана при взрывном воздействии был выполнен при решении следующих задач:

- моделирование геомеханических и фильтрационных процессов при проходке выработки буровзрывным способом в режиме сотрясательного взрывания [19];
- исследование влияния длины шпуров при буровзрывном способе проходки на протекание газодинамических процессов [20];
- влияние взрывного воздействия на протекание газодинамических процессов [21, 22].

Выводы. Для исследования влияния технологических воздействий протекание газодинамических процессов в углепородном массиве разработаны математические модели:

- «изменение НДС углепородного массива – нестационарная фильтрация метана – десорбция метана» для моделирования применения разгрузочных щелей, опережающих скважин, надработки и подработки угольных пластов, и для исследования влияния скорости проведения выработки на развязывание ГДЯ;
- «изменение НДС углепородного массива – нестационарная двухфазная фильтрация жидкости и газа – десорбция метана» для моделирования гидровоздействия на угольный пласт;
- «изменение НДС углепородного массива – нестационарная фильтрация метана – десорбция метана – взрывное воздействие» для моделирования торпедирования угольного массива и проходки выработки в режиме сотрясательного взрывания.

Разработаны алгоритмы решения перечисленных связанных задач. Новизна предложенного подхода заключается в возможности исследования нескольких физических и технологических процессов одновременно с учетом их взаимного влияния.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. A coupled DEM and LBM model for simulation of outbursts of coal and gas / S. Xue, L. Yuan, J. Wang [etc]. // *International Journal of Coal Science and Technology*, 2015. – № 2(1). – P. 22-29.
3. Numerical simulation for propagation characteristics of shock wave and gas flow induced by outburst intensity/ A. Zhou, K. Wang, L. Wang [etc]. // *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015. – № 25. – P. 107-112.
4. Paterson, L. A model for outbursts in coal / L. Paterson // *International Journal of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 1986. – Vol. 23. – №4. – P. 327-332.
5. Круковская, В.В. Моделирование связанных процессов, происходящих в угленосном массиве при ведении горных работ / В.В. Круковская // *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – № 121. – С. 48-99.*
6. Zienkiewicz, O.C. The finite element method / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – Butterworth-Heinemann, 2000. – Т. 1. – 690 p.
7. Volker, R.W. Non-Linear Flow in Porous Media by Finite Elements / R.W. Volker // *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* – 1969. – № 95. – P. 2093-2114.
8. Ahmed, N. Non-Linear Flow in Porous Media / N. Ahmed, D.K. Suneda // *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* – 1969. – № 95. – P. 1847-1859.
9. Круковская, В.В. Моделирование процесса выброса угля и газа при бурении опережающих скважин в забое выработки / В.В. Круковская // *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – № 77. – С.115-122.*
10. Круковская, В.В. Моделирование действия разгрузочных полостей при проведении подготовительных выработок по выбросоопасным пластам / В.В. Круковская, А.П. Круковский // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – Тула: ТулГУ, 2011. – № 1. – С. 129-136.*
11. Круковская, В.В. Применение разгрузочных полостей при проведении подготовительных выработок по выбросоопасным пластам / В.В. Круковская, А.П. Круковский // *Матеріали міжнародної конференції Форум гірників-2011. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2011. – С. 121-127.*
12. Круковская, В.В. Влияние глубины внедрения в выбросоопасную зону на протекание газодинамических процессов вблизи тектонических нарушений / В.В. Круковская // *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – № 119. – С. 100-111.*
13. Маскет, М. Физические основы технологии добычи нефти / М. Маскет. – Москва-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2003. – 606 с.
14. Круковская, В.В. Расчет параметров связанных процессов изменения напряженного состояния массива и двухфазной фильтрации жидкости и газа при нагнетании воды в угольный пласт / В.В. Круковская, В.В. Зберовский // *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – № 123. – С. 11-25.*
15. Численное моделирование гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты / А.Ф. Булат, В.В. Круковская, А.П. Круковский, В.В. Зберовский // *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – № 105. – С. 14-25.*
16. Боровиков, В.А. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород / В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин. – М.: Недра, 1990. – 231 с.
17. Анализ факторов интенсификации процессов проходки горных выработок и ведения очистной выемки руд буровзрывным способом: отчет о НИР / ИГТМ НАН Украины; рук. Э.И. Ефремов, исполн. К.С. Ищенко, И.Л. Кратковский [и др.]. – Днепропетровск, 2012. – Т. 4. – 49 с.
18. Ефремов, Э.И. Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах / Э.И. Ефремов, В.Н. Харитонов, И.А. Семенюк. – М.: Недра, 1979. – 253 с.
19. Лукинов В.В. Математическое моделирование геомеханических и фильтрационных процессов при проходке выработки буровзрывным способом в режиме сотрясательного взрывания / В.В. Лукинов, В.В. Круковская, А.П. Круковский // *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2009. – № 81. – С.147-156.*
20. Круковская, В.В. Исследование влияния длины шпуров при буровзрывном способе проходки на протекание газодинамических процессов в забое выработки / В.В. Круковская, А.П. Круковский,

Ю.В. Виноградов // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2010. – № 3. – С. 14-20.

21. Круковская, В.В. Анализ изменения параметров фильтрации метана в забое выработки, проводимой по выбросоопасному пласту буровзрывном способом / В.В. Круковская // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – № 88. – С. 59-70.

22. Круковская, В.В. Изменение параметров процесса выброса угля и метана при различных способах проведения выработки / В.В. Круковская // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – Тула: ТулГУ, 2012. – №2. – С. 220-228.

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. Xue, S., Yuan, L., Wang, J. et al. (2015), “A coupled DEM and LBM model for simulation of outbursts of coal and gas”, *International Journal of Coal Science and Technology*, no. 2(1), pp. 22-29.

3. Zhou, A., Wang, K., Wang, L. etc. (2015), “Numerical simulation for propagation characteristics of shock wave and gas flow induced by outburst intensity”, *International Journal of Mining Science and Technology*, no. 25, pp. 107-112.

4. Paterson, L. (1986), “A model for outbursts in coal”, *International Journal of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, V.23, no.4, pp. 327-332.

5. Krukovskaya, V.V. (2015), “Simulation of coupled processes that occur in coal-rock massif during mining operations”, *Geo-technical Mechanics*, no. 121, pp. 48-99.

6. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (2000), *The finite element method*, Butterworth-Heinemann.

7. Volker, R.W. (1969), “Non-Linear Flow in Porous Media by Finite Elements”, *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, no. 95, pp. 2093-2114.

8. Ahmed, N. and Suneda, D.K. (1969), “Non-Linear Flow in Porous Media”, *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, no. 95, pp. 1847-1859.

9. Krukovskaya, V.V. (2008), “Modelling of process of coal and gas outburst at drilling of advance bores in the mine face”, *Geo-technical Mechanics*, no. 77, pp. 115-122.

10. Krukovskaya, V.V. and Krukovskiy, A.P. (2011), “Modelling of unloading cavities in the development opening on the seams dangerous on coal and gas outbursts”, *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, no. 1, pp. 129-136.

11. Krukovskaya, V.V. and Krukovskiy, A.P. (2011), “Application unloading cavities in the development workings on the outburst seams”, *Materialy mizhnarodnoi konferentsii Forum girnykiv-2011* [Proceeding of the International conference Forum of miners -2011], *Forum of miners -2011*, Dnipropetrovsk, Ukraine, pp. 121-127.

12. Krukovskaya, V.V. (2014), “Influence of penetration depth in outburst danger zone on the gas-dynamic processes near tectonic displacement”, *Geo-technical Mechanics*, no. 119, pp. 100-111.

13. Masket, M. (2003), *Fizicheskie osnovy tehnologii dobychi nefi* [Physical fundamentals of oil production technology], Moscow-Izhevsk, Russia.

14. Krukovskaya, V.V. and Zberovskiy, V.V. (2015), “Calculation parameters of coupled processes of stressed state change and two-phase fluid filtration at water infusion in coal seam”, *Geo-technical Mechanics*, no. 123, pp. 11-25.

15. Bulat, A.F., Krukovskaya, V.V., Krukovskiy, A.P. and Zberovskiy, V.V. (2012), “Numerical simulation of hydroimpulsive impact on outburst coal seam”, *Geo-technical Mechanics*, no. 105, pp. 14-25.

16. Borovikov, V.A. and Vanyagin, I.F. (1990), *Modelirovanie deystviya vzryva pri razrushenii gornykh porod* [Simulation steps explosion in rock failure], Moscow, Nedra, Russia.

17. Efremov, E.I., Ischenko, K.S., Kratkovskiy, I.L. et al. (2012), *Analiz faktorov intensivifikatsii protsesov prokhodki gornykh vyrabotok i vedeniya ochistnoy vyemki rud burovzryvnym sposobom: otchet o NIR* [The analysis of factors road heading intensify and mining operations by drill and fire system: Report of research], IGTM of the NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.

18. Efremov, E.I., Haritonov, V.N. and Semenyuk, I.A. (1979), *Vzryvnoe razrushenie vybrosoopasnykh porod v glubokikh shakhtakh* [The explosive rupture of outburst rocks in deep mines], Moscow, Nedra, USSR.

19. Krukovskaya, V.V. and Krukovskiy, A.P. (2009), “Mathematical simulation of geomechanical and filtration processes at road heading by drill and fire system mode shaker blasting”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 81, pp.147-156.

20. Krukovskaya, V.V., Krukovskiy, A.P. and Vinogradov, Yu.V. (2010), "Investigation of the holes length effect at the drill and fire system of road heading in the course of gas-dynamic processes in the working face", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no 3, pp. 14-20.

21. Krukovskaya, V.V. (2010), "The analysis of methane filtration parameters in the mine face at the drive working by blast-hole drilling on the seam dangerous on coal and gas outbursts", *Geo-technical Mechanics*, no. 88, pp. 59-70.

22. Krukovskaya, V.V. (2012), "Change of parameters of the coal and gas outburst at various ways of development", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, no. 2, pp. 220-228.

Об авторе

Круковская Виктория Викторовна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, igtm@ua.fm.

About the author

Krukovskaya Victoriya Victorovna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Control of Dynamic Demonstrations of Rock Pressure, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, igtm@ukr.net.

Анотація. Протікання газодинамічних процесів в вуглепородному масиві тісно пов'язане з технологічними факторами. Дослідження і встановлення закономірностей протікання газодинамічних процесів при різних технологічних впливах має велике значення для наукового обґрунтування параметрів різних способів їх запобігання, підвищення ефективності і безпеки вуглевидобутку.

Для моделювання застосування розвантажувальних щілин, випереджальних свердловин, надробки і підробки вугільних пластів, для дослідження впливу швидкості проведення виробки на розв'язування ГДЯ розроблена математична модель «зміна НДС вуглепородного масиву – нестационарна фільтрація метану – десорбція метану». Для моделювання зволоження та гідродіяння на вугільний пласт – модель «зміна НДС вуглепородного масиву – нестационарна двохфазна фільтрація рідини і газу – десорбція метану». Для моделювання торпедування вугільного масиву і порід покрівлі пласта, проходки виробки в режимі струсного підривання розроблена математична модель «зміна НДС вуглепородного масиву – нестационарна фільтрація метану – десорбція метану – вибуховий вплив». Розроблено алгоритми рішення перерахованих зв'язаних задач. Новизна запропонованого підходу полягає в можливості дослідження декількох фізичних і технологічних процесів одночасно з урахуванням їх взаємного впливу.

Ключові слова: моделювання зв'язаних процесів, газодинамічні явища, способи запобігання газодинамічних явищ.

Abstract. Gas-dynamic processes in coal rock mass is closely related to technological factors. Knowing of gas-dynamic process dynamics at various technological actions is of great importance for scientific substantiation of parameters for various methods of preventing these processes and for improving the coal mining efficiency and safety.

A mathematical model «changes in the stress-strain state of coal rock massif – nonstationary methane filtration – methane desorption» was developed in order to simulate unloading slots, advance bores, overworked and underworked coal seams, and to study effect of drifting rate on occurrence of gas-dynamic phenomena. Further, a mathematical model «changes in the stress-strain state of the coal-rock massif – nonstationary two-phase filtration of liquid and methane – methane desorption» was developed in order to simulate rate of damping and impact of hydraulic actions on the coal seam. Further, a mathematical model «changes in the stress-strain state of coal rock massif – nonstationary methane filtration – methane desorption – explosive impact» was developed in order to simulate the coal-seam and the seam roof rocks shooting, rate of roadway driving and dynamics

of explosion. Algorithms for solving these interconnected problems were also developed. The novelty of this approach lays in opportunity to study several natural and technological processes and, at the same time, to take into account their mutual influence.

Keywords: coupled process simulation, gas-dynamic phenomena, methods of gas-dynamic phenomena preventing.

Статья поступила в редакцию 11.10.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Минеевым С.П.

УДК 550.344.094.4:537.528:622.245.5

Смирнов А. П., канд. техн. наук
(ИИПТ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В ГОРНОЙ ПОРОДЕ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ В ЖИДКОСТИ

Смірнов О. П., канд. техн. наук
(ІПТ НАН України)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ В ГІРСЬКІЙ ПОРОДІ ХВИЛІ ТИСКУ, ЯКА ГЕНЕРУЄТЬСЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ РОЗРЯДОМ У РІДИНІ

Smirnov O. P., Ph.D. (Tech.)
(IPPT NAS of Ukraine)

THE STUDY OF PROPAGATION OF THE PRESSURE WAVE GENERATED BY ELECTRIC DISCHARGE IN THE FLUID IN THE ROCKS

Аннотация. В работе представлена методика расчета параметров волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости, в горной породе на заданном расстоянии от источника возмущения. С ее помощью, используя экспериментально полученный профиль волны давления, было выполнено численное исследование ее распространения в призабойной зоне скважины при электроразрядном способе декольматации. Результаты исследования показали, что при электроразрядном способе декольматации воздействию подвергается не только стенка скважины и перфорационные отверстия, но и ближайшая к стволу скважины часть призабойной зоны. Полученные результаты, несмотря на факт полного затухания волны давления в ближних районах призабойной зоны, позволяют сделать вывод о целесообразности применения электроразрядного воздействия для обработки нефтедобывающих скважин с целью повышения их дебита.

Ключевые слова: электрический разряд в жидкости, волна давления, коэффициент затухания, горная порода.

Введение

Электрический разряд в жидкости уже много лет эффективно применяется для декольматации добывающих скважин с целью увеличения их производительности [1-3].