

А.Ф. Булат, акад. НАНУ, д-р техн. наук, профессор,
В.В. Круковская, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
В.В. Зберовский, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ НДС И ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГНЕТАНИЯ ВОДЫ В УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ

Аннотация. Наведено результати чисельного моделювання зв'язаних нестационарних процесів зміни НДС гірського масиву і двохфазної фільтрації рідини та газу. Показано розподіли значень геомеханічних і фільтраційних параметрів в різні моменти часу гідродіяння на вугільний пласт у вибої гірничої виробки.

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

A.F. Bulat, Acad. NASU, D. Sc. (Tech.), Professor,
V.V. Krukovskaya, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher,
V.V. Zberovsky, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NASU)

COMPARISON OF PARAMETERS OF COUPLED PROCESSES MODE OF MASSIF DEFORMATION CHANGE AND FLUID FILTRATION IN DIFFERENT MODES OF WATER INFUSION IN COAL SEAMS

Abstract. The results of numerical simulation of the coupled nonstationary processes of stress-strain state change of rock massif and two-phase filtration of liquid and gas are presented. Distributions of values of geomechanical and filtration parameters in different time moments of water infusion in coal seam in mine face are shown.

Keywords: water infusion in the static and pulsed mode into the coal seam, coupled processes, numerical simulation

В условиях больших глубин способы предотвращения газодинамических явлений (ГДЯ) в забоях выработок на неразгруженных горными работами угольных пластах стали недостаточно эффективными. Анализ применения наиболее распространённого способа гидрорыхления выбросоопасных пластов [1] показывает, что возможности повышения его эффективности исчерпаны [2]. Снижение эффективности профилактических мероприятий в забоях подготовительных выработок приводит к необходимости применения буровзрывных работ в режиме сотрясательного взрывания, снижению темпов проведения и, как следствие, к увеличению затрат.

Повышение эффективности гидрорыхления и других способов, основанных на нагнетании жидкости, возможно путём перехода от статического режима нагнетания к импульсному. В работе [3] авторами приведены результаты исследования влияния гидроимпульсного воздействия на краевую часть угольного пласта путём моделирования процессов изменения напряжённо-деформированного состояния (НДС) массива горных пород и двухфазной фильтрации жидкости и газа.

Целью данной работы является сопоставление результатов численного моделирования связанных процессов изменения напряжённого состояния массива и

двухфазной фильтрации жидкости и газа при нагнетании воды в угольный пласт при статическом и импульсном режимах воздействия.

Последовательность моделируемых технологических операций включает:

- 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.

В качестве условий моделирования принято: природная газоносность пласта $x = 20 \text{ м}^3/\text{т}$; мощность пласта $m = 1,5 \text{ м}$; глубина залегания $H = 1000 \text{ м}$. В расчётах учитывалось изменение проницаемости угольного пласта в зависимости от его напряжённого состояния.

При помощи метода конечных элементов решалась система дифференциальных уравнений, описывающих изменение во времени напряжённо-деформированного состояния породного массива, фильтрацию жидкости и газа [3]:

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

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

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

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

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;

μ_w – вязкость жидкости;

s – концентрация жидкости, насыщенность жидкостью трещинно-порового пространства;

K_w – коэффициент проницаемости для жидкости;

q_w – интенсивность источников выделения;

p – давление газа;

K_g – коэффициент проницаемости;

μ_g – вязкость газа;

q_g – интенсивность источников газовой выделения;

K – абсолютная проницаемость.

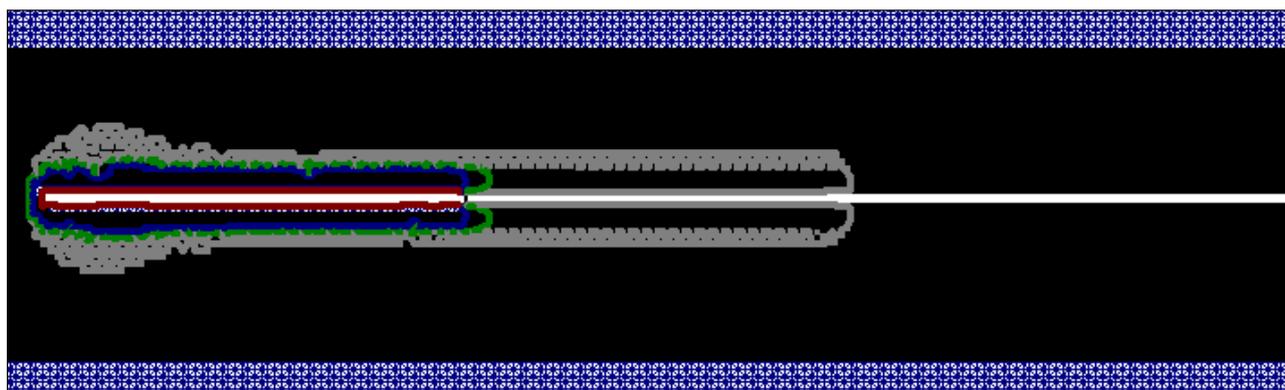
Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона – Мора.

геомеханического параметра $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\gamma h)$, характеризующего степень разнокомпонентности поля напряжений, для этих случаев.

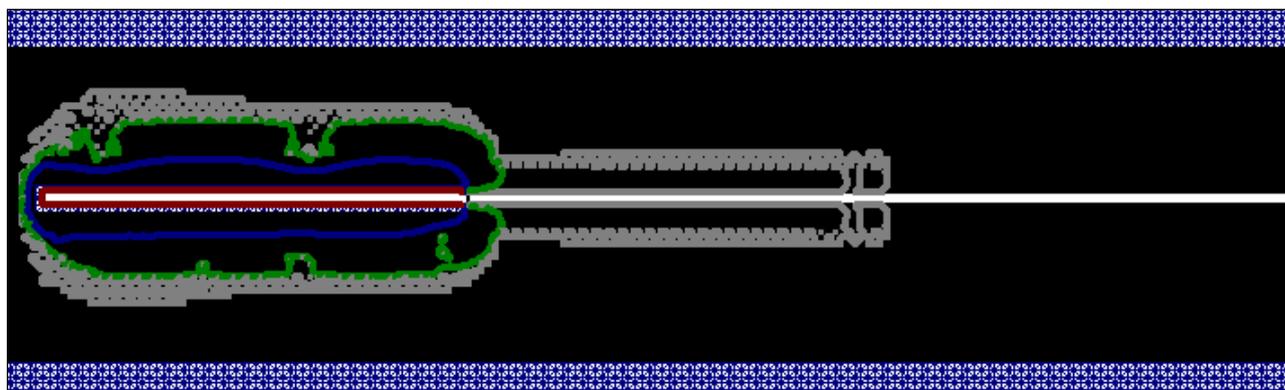
Как видно из рисунков, область повышенной разнокомпонентности ($0,4 < Q < 0,8$) вокруг скважины увеличивается со временем, при гидроимпульсном воздействии она имеет большие размеры, чем при гидрорыхлении. Зона неупругих деформаций в области гидровоздействия при статическом режиме нагнетания практически 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 остаётся практически 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 её как область разрушения. Хрупкое разрушение угля характеризуется ростом деформаций, разрыхления и, соответственно, объёма материала. Это приводит к резкому росту проницаемости угля (коэффициент проницаемости принимает здесь максимальные значения) и увеличению зоны равномерного гидрорыхления пласта.

На рис. 2 приведены линии уровня насыщенности порового пространства водой при гидрорыхлении пласта в статическом и импульсном режимах. Как и следовало ожидать, область гидровоздействия при импульсном нагнетании имеет значительно большие размеры.



а – статический режим воздействия



б – импульсный режим воздействия

— $s = 100\%$; — $s = 50\%$; — $s = 5\%$; — $s < 0,01\%$

Рис. 2 – Изолинии насыщенности водой трещинно-порового пространства, $i = 5$

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.

Изобары давления метана в различные моменты времени показаны на рис. 3.

На первых временных итерациях закачиваемая жидкость перемещается вглубь пласта, оттесняя и сжимая метан (рис. 5, а,б). На рис. 5 увлажнённые области с оттеснённым метаном показаны изобарами $p/p_0 \geq 1$. После прекращения нагнетания жидкости в скважину, 6-9 итерации, начинается медленная фильтрация метана в нарушенной области. Микротрещины и поры при этом ещё закрыты смачивающей фазой воды, поэтому отток метана из них затруднён. На 10-й временной итерации происходит подвигание забоя выработки на 3,0 м. Фильтрация метана в угольном пласте продолжается и область, подвергаясь гидровоздействию, постепенно дегазируется, рис. 5,в. При гидроимпульсном воздействии область, в которой $p/p_0 < 1$, имеет большие размеры, следовательно, фильтрация метана в ней происходит быстрее, чем при гидрорыхлении.

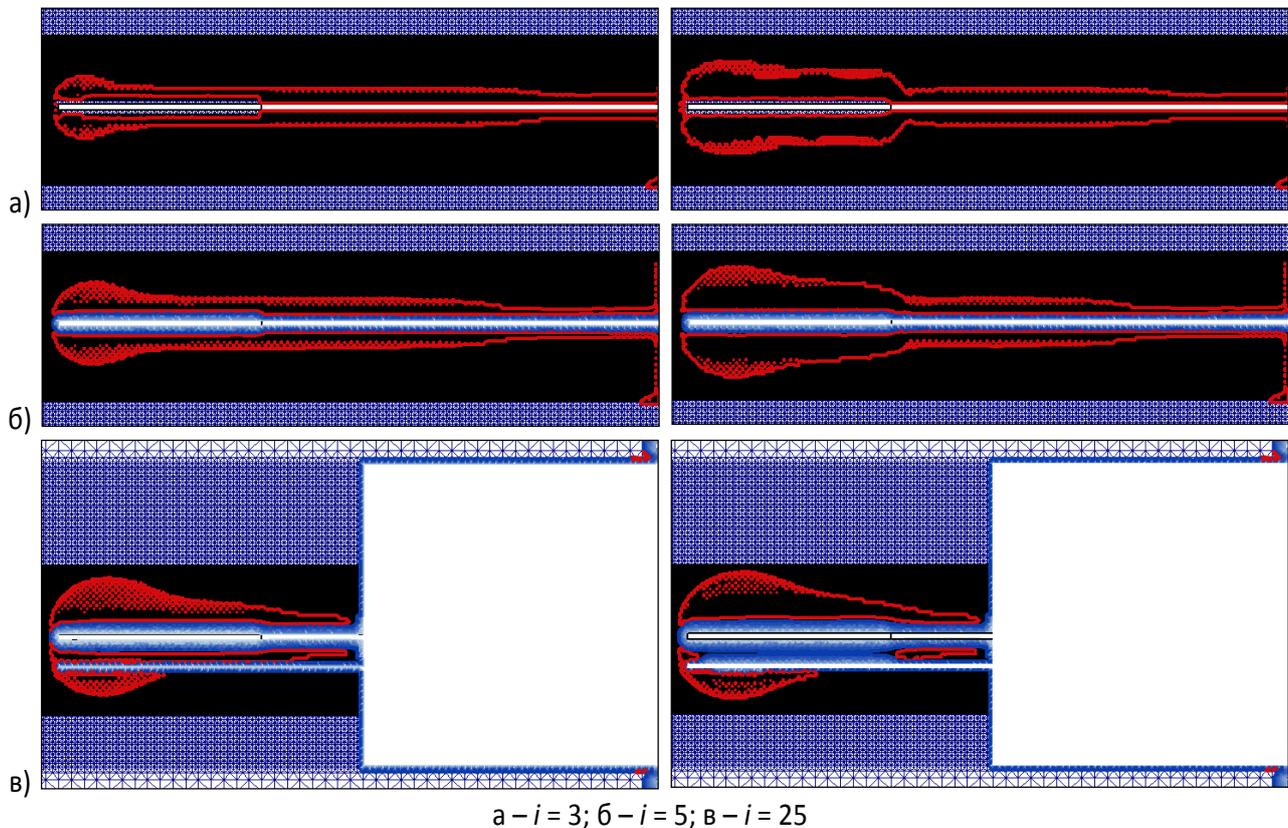


Рис. 3 – Область гидровоздействия, изолинии насыщенности водой трещинно-порового пространства при статическом (слева) и импульсном (справа) режимах воздействия

Исследуем, как изменяются во времени параметры рассматриваемых процессов. На рис. 4 и рис. 5 показано изменение насыщенности водой трещинно-порового пространства вокруг скважины на различных этапах гидровоздействия, при $i = 1-10$.

Видно, что радиус области гидровоздействия при высоконапорном нагнетании жидкости в импульсном режиме более, чем в 2 раза, превышает радиус области гидровоздействия при нагнетании жидкости в статическом режиме.

На 1-5 временных итерациях насыщенность на поверхности скважины ($x = 0$) равна 100 % – происходит процесс гидровоздействия и в первом и во втором случаях, скважина заполнена водой. На этом этапе с каждой итерацией возрастает

глубина проникновения жидкости. После сброса давления на 6-й итерации начинается процесс обратной фильтрации воды из угольного пласта в скважину, которая в этот момент уже не заполнена водой. Кривые на рис. 4 и рис. 5 в точке $x = 0$ теперь имеют значение 0 %. На этом этапе воздействия значения насыщенности w внутри области фильтрации с каждым моментом времени снижаются с 50 до 10 % в обоих случаях.

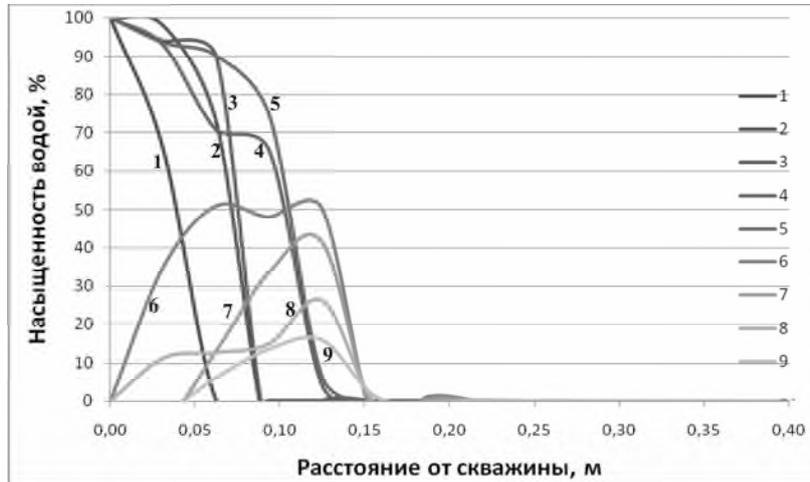


Рис. 4 – Насыщенность водой порового пространства при гидровоздействии в статическом режиме

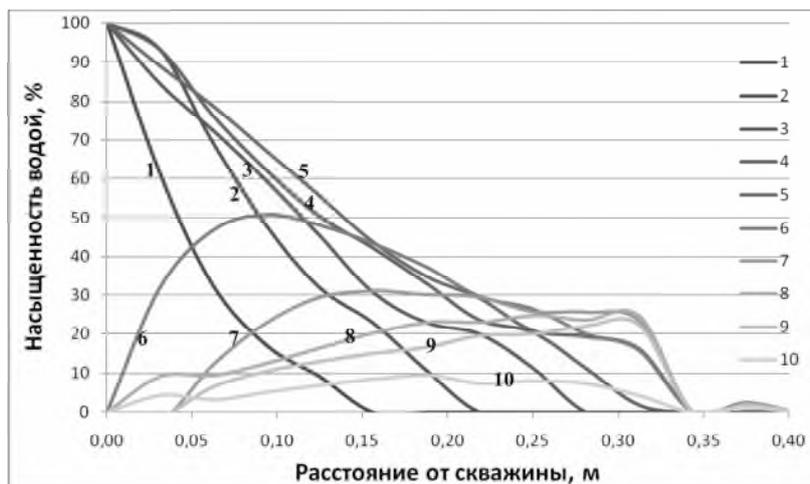


Рис. 5 – Насыщенность водой порового пространства при гидровоздействии в импульсном режиме

На рис. 6 показано изменение скоростей фильтрации метана вокруг скважины на различных этапах гидровоздействия при статическом и импульсном режимах нагнетания жидкости, а также без применения противовыбросных мероприятий.

На этапе применения гидровоздействия (1-5 временные итерации) скорости фильтрации газа невелики – пути фильтрации перекрыты жидкостью, закачиваемой в угольный пласт под высоким давлением. В это же время величина средней скорости

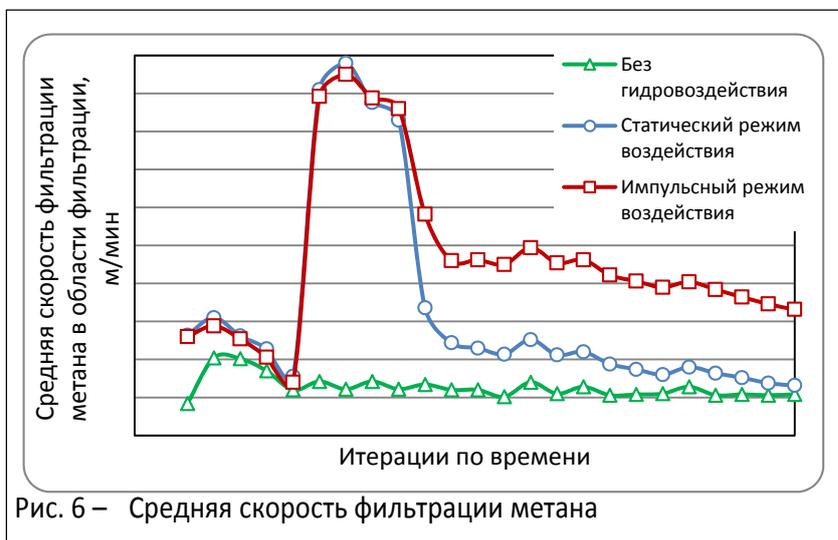


Рис. 6 – Средняя скорость фильтрации метана

фльтрации в случае, когда противовыбросные мероприятия не применяются вообще, ещё меньше по значению, так как в ненарушенном массиве этот процесс происходит очень медленно. После сброса давления жидкости в скважине (6-10 временные итерации) возрастает интенсивность фильтрации метана – скорости фильтрации достигают максимальных значений. Затем

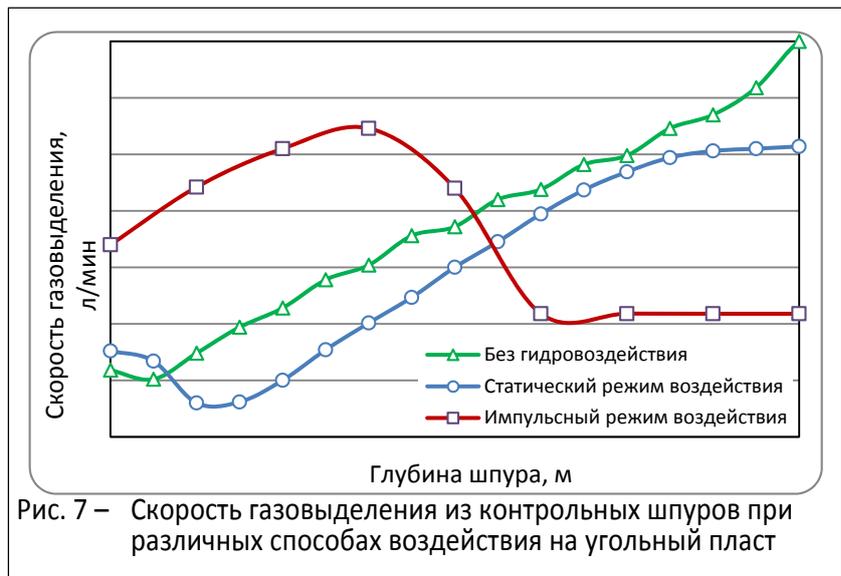


Рис. 7 – Скорость газовой выделенности из контрольных шпуров при различных способах воздействия на угольный пласт

они снижаются, причём при гидрорыхлении в импульсном режиме они остаются в 1,5 раза более высокими, чем при гидрорыхлении в статическом режиме.

Изменение начальной скорости газовой выделенности из контрольных шпуров по временным итерациям в точках замера показано на рис. 7.

По результатам моделирования видно, что без проведения противовыбросных мероприятий скорость газовой выделенности из контрольных шпуров постоянно возрастает, кривая – 1. При гидровоздействии в статическом режиме этот параметр имеет более низкие значения и на глубине близкой 3,0 м, что соответствует величине зоны разгрузки, её значения остаются практически на уровне 2,5 л/мин, кривая – 2. Это говорит о стабилизации процесса фильтрации, о его переходе к установившемуся режиму в обработанной зоне. При гидроимпульсном воздействии на первых временных итерациях скорость газовой выделенности из контрольных шпуров до глубины 2,0 м имеет самые высокие значения из всех трёх случаев. Затем, в обработанной зоне, она резко снижается и остаётся постоянной, приблизительно равной 1 л/мин, что говорит о высокой эффективности дегазации и отсутствии вероятности развязывания газодинамических явлений.

Для оценки достоверности решения задачи сравним начальную скорость газовой выделенности из контрольных шпуров с фактическими данными, полученными в 24-ом восточном конвейерном штреке ш/у «Суходольское-Восточное», при трёх вариантах: а) противовыбросные мероприятия не проводятся, рис. 8; б) при гидрорыхлении угольного пласта, рис. 9; в) при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт, рис. 10.

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

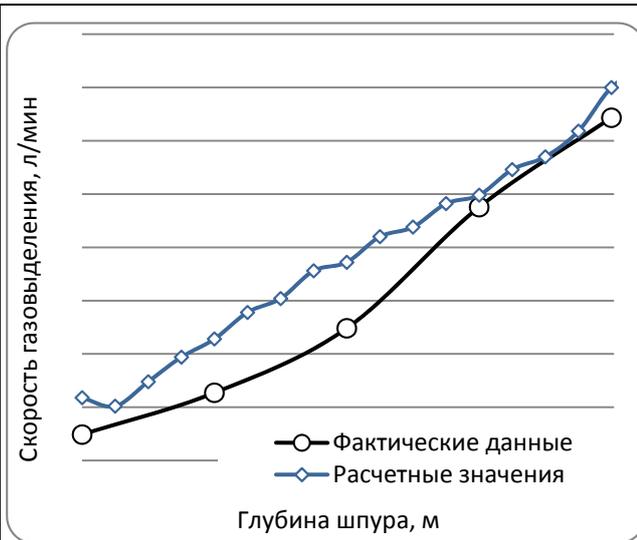


Рис. 8 – Изменение начальной скорости газовой выделенности из шпуров при отсутствии противовыбросных мероприятий

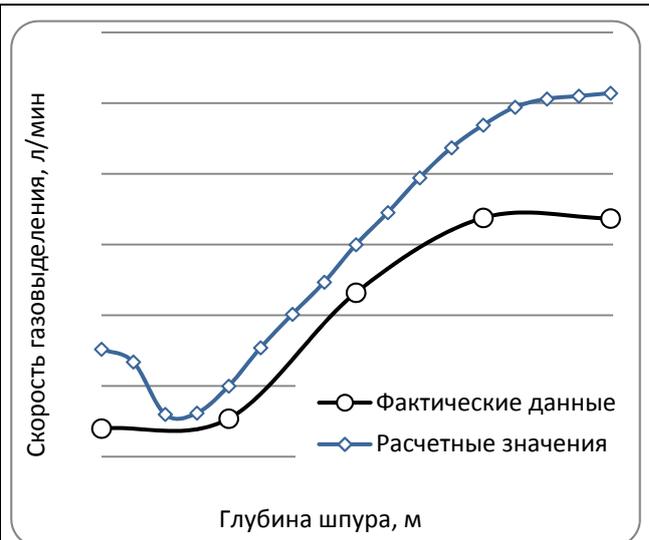


Рис. 9 – Изменение начальной скорости газовой выделенности из шпуров при гидрорыхлении угольного пласта

Выводы. При помощи разработанной математической модели связанных процессов изменения напряжённо-деформированного состояния углепородного массива и двухфазной фильтрации жидкости и газа в нарушенной области при различных способах нагнетания воды в скважину проведено исследование напряжённого состояния в забое выработки, распределения насыщенности водой трещино-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 воздействия имеет большие размеры, чем при статическом. Следовательно, область эффективного гидровоздействия при гидрорыхлении выбросоопасного угольного пласта в статическом режиме нагнетания жидкости значительно меньше, чем при гидроимпульсном воздействии.

Характер распределения полученных зависимостей и расчётных 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».

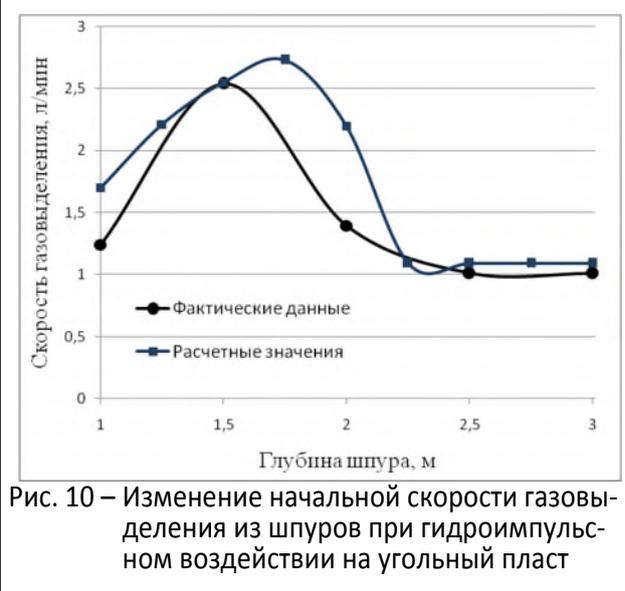


Рис. 10 – Изменение начальной скорости газовой выделенности из шпуров при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СОУ 10.1.00174088.011-2005. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ. Введений вперше 30.12. 2005 Мінвуглепром України. – К.: Вид-во Мінвуглепром України, 2005. – 225 с.

2. Бойко, Я.И. Повышение эффективности гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов в подготовительных выработках и нишах / Я.И. Бойко, А.В. Никифоров, А.А. Рубинский // Способы и средства создания безопасных условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбас, 2009. – № 2(24). – С. 52-57.
3. Булат, А.Ф. Численное моделирование гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты / А.Ф. Булат, В.В. Круковская, А.П. Круковский, В.В. Зберовский // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 105. – С. 14-25.

Об авторах

Булат Анатолий Федорович, академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, директор института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, igtmnanu@yandex.ru

Круковская Виктория Викторовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина

Зберовский Василий Владиславович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина

About the authors

Bulat Anatoly Fedorovich, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Director of the Institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtmnanu@yandex.ru

Krukovskaya Viktoriya Viktorovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtm@ua.fm

Zberovsky Vasily Vladislavovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine

Д.Л. Васильев, канд. техн. наук, научн. сотр.,
Ю.Е. Поляков, аспирант, инженер
(ИГТМ НАН Украины),
Ю.А. Костандов, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.,
Л.Я. Локшина, научн. сотр.
(ТНУ им. В.И. Вернадского)

МЕТОД РАСЧЁТА ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ УСЕЧЁННО-КОНУСНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОСТОЯННОМ КОНТАКТНОМ КАСАТЕЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

Аннотация. Изучено напряжённо-деформированное состояние образца горной породы усечено-конусной формы при его одноосном сжатии. Разработан метод расчёта предела прочности образцов усечено-конусной формы при одноосном сжатии, получено выражение для расчёта их предела прочности. Учтено влияние внутреннего трения материала и контактного трения на поверхности приложения нагрузки на предельные напряжения в образце. Установлена зависимость между углом конусности и пределом прочности образцов усечено-конусной формы. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными и установлено их удовлетворительное соответствие.

Ключевые слова: контактные напряжения, касательные, напряжения, разрушение образца, усечённо-конусная форма

D.L. Vasilyev, Ph. D. (Tech.), Scientific Associate,
Yu.Ye. Polyakov, Doctoral Student, Engineer
(IGTM NAS of Ukraine)

Yu.A. Kostandov, Ph. D. (Phys.-Math.), Senior Researcher,
L.Ya. Lokshina, Scientific Associate
(V.I. Vernadsky TNU)

THE METHOD OF CALCULATING COMPRESSIVE STRENGTH OF THE TRUNCATED CONICAL ROCK SAMPLES AT A CONSTANT CONTACT SHEAR STRESS

Abstract. The stress-strain state of a rock sample of truncated conical shape at its uniaxial compression is studied. The method for calculating the ultimate strength of the samples truncated-cone shape under uniaxial compression is developed, and we get the expression for the calculation of their ultimate strength. The influence of internal friction of the material and contact friction on the load application surface on the limit stress in the sample is taken into account. The relationship between the cone angle and the ultimate strength of the truncated-cone shape samples has been established. A comparison of the obtained results with experimental data shows their satisfactory conformity.

Keywords: contact, shear, strain, fracture sample, truncated-cone shape

Одним из основных параметров оценки напряжённо-деформированного состояния горных массивов и разрушения их исполнительными органами горных машин является предел прочности горных пород при одноосном сжатии.

В 60-е годы прошлого столетия в бывшем СССР и за рубежом для получения достоверных данных о пределе прочности материалов были созданы специальные прессы, в элементах которых напряжения и перемещения при заданной нагрузке значительно меньше напряжений и перемещений в испытываемых образцах. В СССР такие прессы имелись в отдельных НИИ (ВНИМИ, ИГТМ НАНУ, ИФГП НАНУ, ИГД им. Скочинского, ИГМОН НАН Киргизии и др.). Но они требуют высококвалифицированного обслуживания и располагаются вдали от горных предприятий, где требуется оперативность получения информации о свойствах горных пород. Поэтому актуальной является разработка метода аналитического расчёта предела