метана. Количество суфляров метана возрастает с увеличением интенсивности малоамплитудной разрывной нарушенности и локальной складчатости угольного пласта. Оптимальными для образования локального скопления свободного метана в угленосной толще исследуемого района являются: интенсивность малоамплитудной разрывной нарушенности от Кн = $1 \cdot 10^{-3}$ до Кн = $4 \cdot 10^{-3}$ и угол локальной складчатости от 2° до 4°. В более интенсивно нарушенных участках угольного пласта (Кн > $4 \cdot 10^{-3}$ и φ > 4°) происходит его дегазация. Непосредственной кровлей угольного пласта на участках возникновения суфляров метана являются глинистые породы, служащие экраном.

УДК 622.831.322:622.23.085

Канд. техн. наук В. В. Круковская
(ИГТМ НАН Украины)

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРАЦИИ МЕТАНА В ЗАБОЕ ВЫРАБОТКИ, ПРОВОДИМОЙ ПО ВЫБРОСООПАСНОМУ ПЛАСТУ БУРОВЗРЫВНОМ СПОСОБОМ

Виконано чисельне моделювання процесу викиду вугілля та метану у вибої одиночної гірничої виробки, що проводиться буропідривним способом по викидонебезпечному пласту. Проаналізовано зміну розподілів коефіцієнтів проникності поперед вибоєм, значень тиску та швидкості руху газу.

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

Numerical modeling of process of coal and methane outburst in a working face of single opening, what is driving by drill and fire system on the seam dangerous on coal and gas outbursts, is executed. Change of distribution of permeability coefficient ahead of a face, pressure values and speed of gas motion is analysed.

Взрывные работы (технологические и особенно сотрясательное взрывание) зачастую являются причиной выбросов угля и газа и единственной причиной выбросов породы и газа [1]. Статистика выбросов, произошедших в результате ведения взрывных работ, в различных угледобывающих странах мира представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Количество выбросов, произошедших в результате ведения взрывных работ

№	Страна	Количество выбросов, %
1	Франция	65-95
2	Германия	более 65
3	Великобритания	более 60
4	Канада	90-93
5	Китай	около 70
6	Польша	70

В Донецком угольном бассейне в подготовительных выработках на пологих пластах 26 % выбросов произошли непосредственно во время или после ведения БВР, по данным за период 1976-1987 г. [2].

Задача о взрыве зарядов ВВ в газонасыщенном углепородном массиве с одиночной выработкой состоит в определении изменяющегося во времени напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки, параметров нестационарной фильтрации газа и распространения взрывной волны. Изменение напряженно-деформированного состояния среды влечет за собой изменение ее проницаемости. Поле значений коэффициентов проницаемости обуславливает изменение параметров фильтрации газа, в том числе и его давление в трещинно-поровом пространстве. В свою очередь, изменение давления газа влияет на напряженное состояние среды. Кроме этого, во время распространения волны сжатия от взрыва заряда ВВ скачок давления на ее фронте и отраженная от поверхности забоя волна растяжения накладывают определенные возмущения на поле напряжений и поле давлений газа.

Для упрощения расчетов примем, что взрывание шпуровых зарядов в забое выработки происходит одновременно. В этот момент времени вглубь массива начинает распространяться волна сжатия, накладывая на существующее поле напряжений дополнительные сжимающие напряжения, вызванные взрывом.

Для расчета радиальной $\sigma_r(r,t)$ и тангенциальной $\sigma_\varphi(r,t)$ составляющих волны напряжений от взрыва сосредоточенного заряда, в диапазоне расстояний $r = (20 \div 100)R_0$, где R_0 – радиус заряда, будем использовать зависимости Боровикова В. А. и Ванягина И. Ф. [3].

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.

Нестационарное напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки, проницаемость среды и нестационарное нелинейное движение газа в нарушенном массиве описываются системой уравнений [4]:

$$
\begin{aligned}
&\sigma_{ij,j} + X_i(t) + Y_i(t) + T_i(t) + P(t) = \rho_n\left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}\right),\ i, j = x, y;\\
&\mu_z \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial p}{\partial y}\right) + q(t) = 0;\\
&k = k_{тект}(x, y) + k_{техн}(\sigma_{ij}, t),\\
&k_{техн}(\sigma_{ij}, t) = \begin{cases} 0 \text{ при } Q < 0{,}7;\\ k_{\min} \text{ при } 0{,}7 < Q < 0{,}8;\\ f(\sigma_{ij}, t) = e^{2{,}58\frac{\sigma_1(t)-\sigma_3(t)}{\sigma_2(t)} - 4{,}65} \text{ при } Q > 0{,}8;\\ k_{\max} \text{ при } P < 0{,}1; \end{cases}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y; t – время; $X_i(t)$ – внешние силы; $Y_i(t)$ – сила воздействия взрывной волны; $T_i(t)$ – силы, вызванные внутренним трением, $T_i(t) = -c_g\, \partial u_i / \partial t$; c_g – коэффициент демпфирования, определяемый экспериментально; u_i – перемещения; $P(t)$ – сила давления газа; ρ_n – плотность породы; $\mu_г$ – вязкость газа; p – его давление; $q(t)$ – интенсивность источников газовыделения; k – полное поле коэффициентов проницаемости пород; $k_{техн}$ – технологическая проницаемость, вызванная перераспределением поля напряжений в результате проведения горной выработки; $k_{тект}(x, y)$ – начальная, тектоническая проницаемость, которая развивается в углях в результате тектонических процессов; $Q = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$ и $P = \sigma_3/\gamma H$ – геомеханические параметры.

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.

Начальные и граничные условия для данной задачи:

$$\sigma_{yy}\big|_{t=0} = \gamma h;$$
$$\sigma_{xx}\big|_{t=0} = \lambda \gamma h;$$
$$\sigma_{zz}\big|_{t=0} = \lambda \gamma h;$$
$$p\big|_{t=0} = 0{,}8 \cdot \gamma_{воды} h;$$
$$p\big|_{t=t_{взр},\, x=x_{взр},\, y=y_{взр}} = \frac{p_d}{2};$$
$$p\big|_{\Omega_1(t)} = 0{,}8 \cdot \gamma_{воды} h;$$
$$p\big|_{\Omega_2} = p_v;\;\; p_v = 0{,}1\, МПа;$$
$$k_{тект} = f(x, y);$$
$$u_x\big|_{\Omega_3} = 0;$$
$$u_y\big|_{\Omega_4} = 0;$$

где γ - усредненная плотность вышележащих горных пород; h - глубина разработки; λ - коэффициент бокового распора; $\gamma_{воды}$ - плотность воды;. $\Omega_1(t)$ - изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_2 - внутренний контур; Ω_3 - вертикальные границы внешнего контура; Ω_4 - горизонтальные границы внешнего контура; p_v - давление воздуха в выработке, p_d - детонационное давление; $t_{взр}$ - момент взрыва; $x_{взр}$, $y_{взр}$ - координаты центра взрыва.

Исходя из полученных авторами монографии [5] данных, можно сказать, что детонационное давление для основных ВВ, применяемых на практике, изменяется в пределах $p_d = 1500 \div 24000$ *МПа*.

Чтобы получить решение системы (1) на определенном временном промежутке, применяется конечно-разностный метод. При этом считается, что в начальный момент времени $t = 0$ распределение напряжений и давления задано, и для достаточно малых значений Δt с помощью итерационных соотношений получаем распределение напряжений, давления метана, скоростей его течения и расходов на момент времени $t + \Delta t$. Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого текущего момента времени.

Рассмотрим случай, когда забой выработки высотой 3 м находится на расстоянии 9,75 м от тектонического нарушения типа «сброс» с амплитудой смещения 1 м, вокруг которого расположена десятиметровая зона перемятого угля. Мощность выбросоопасного угольного пласта – 1,5 м, глубина проведения выработки – 1000 м. Газоносность угля – 20 м^3/т, содержание метана в свободной форме – 10 %, в сорбированной – 90 %. Вмещающая порода – аргиллит. Свойства пород приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Характеристики пород

Порода	Модуль упругости, *E, МПа*	Коэффициент Пуассона, μ	Сцепление, *C, МПа*	Угол внутреннего трения, φ^{o}	Прочность на растяжение, σ_p, *МПа*	Плотность, ρ, *кг/м*^{3}	Скорость звука в породе, *c, м/с*
Аргиллит	10^4	0,2	3,5	30	–2	$2*10^3$	$5*10^3$
Уголь	$5*10^3$	0,2	1,75	30	–1	$1,25*10^3$	$3*10^3$

Выработка проводится буровзрывным способом в режиме сотрясательного взрывания. Радиус заряда – $R_0 = 0{,}025$ *м*.

Расчеты проводятся с применением метода конечных элементов. Конечно-элементная сетка, шпуры для отбойки угля и породы показаны на рис. 1. Шаг по времени составляет 0,1 *с*. Взрывание происходит в момент времени $t = 0{,}2$ *с*.

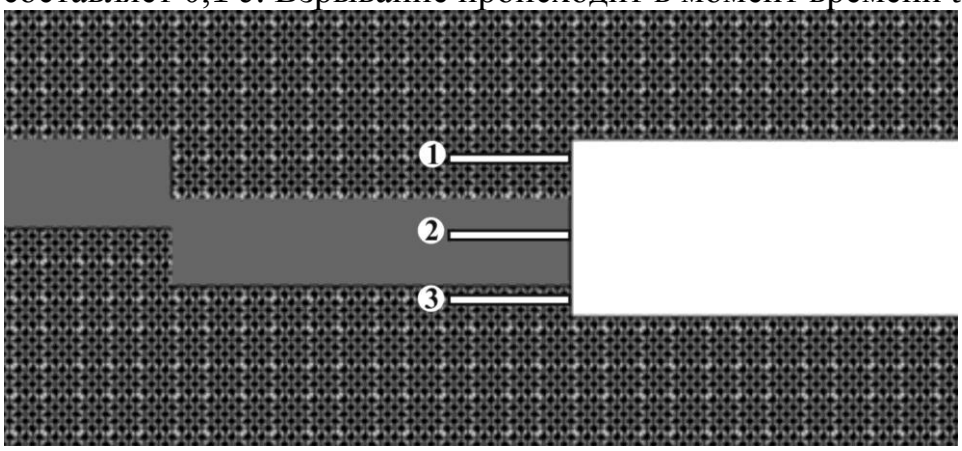
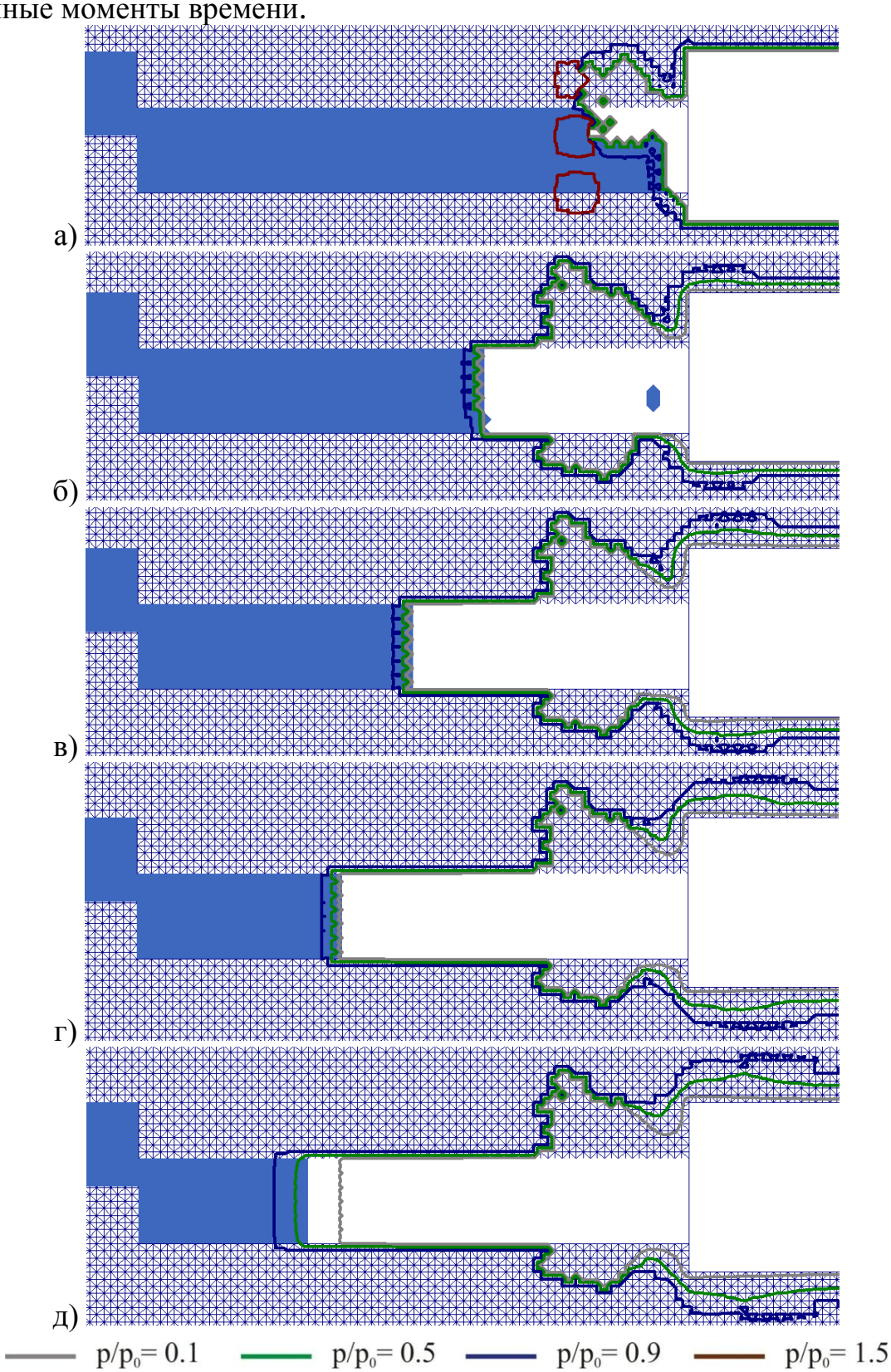


Рис. 1 – Центральный фрагмент конечно-элементной сетки с шпурами для отбойки угля и породы (1-3)

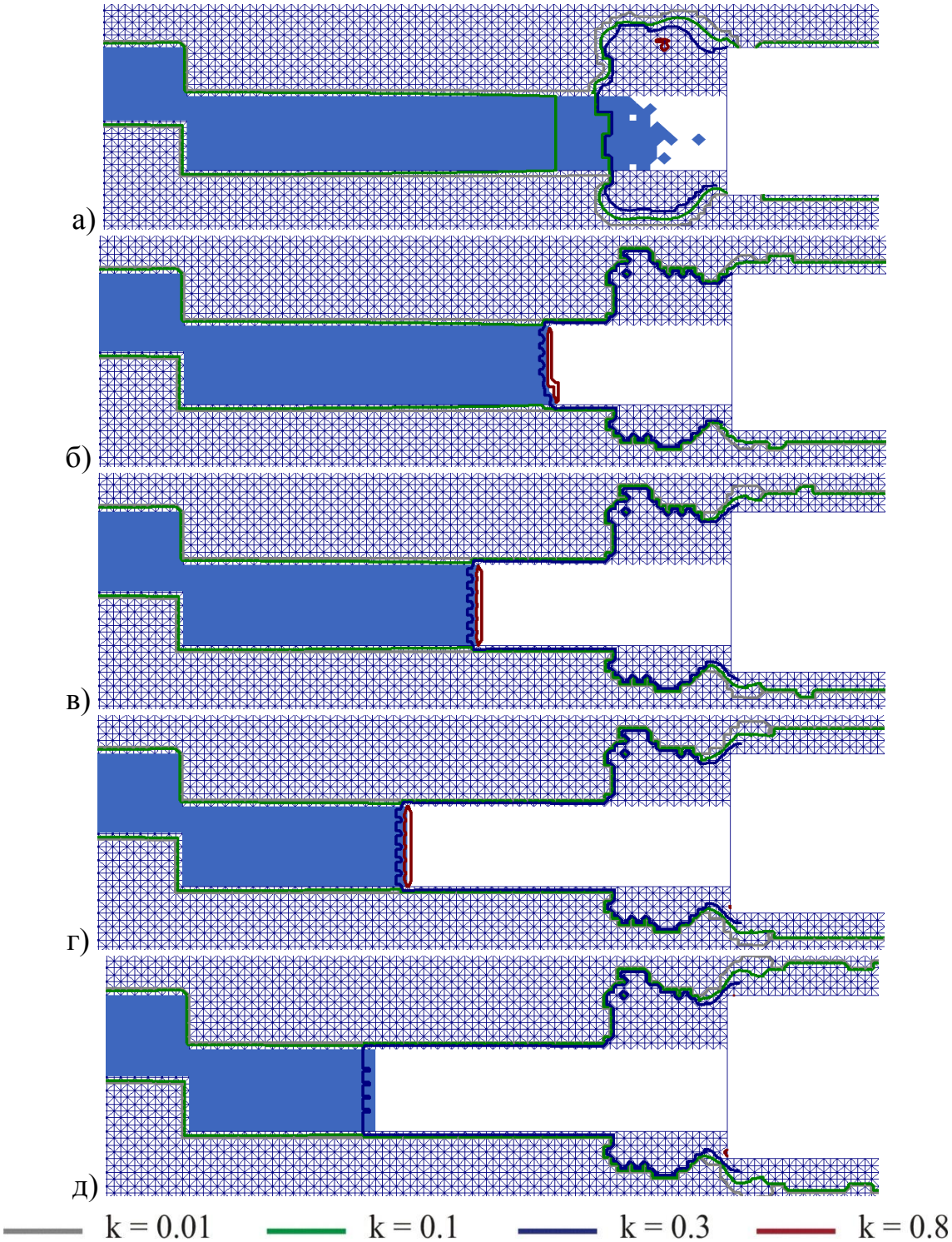
Выполним расчет для случая взрывания зарядов 1-3 с длиной шпуров $l_ш$ = 2,0 *м*. Получим распределения геомеханических и фильтрационных параметров в различные моменты времени.



а) *t* = 0,2*c*; б) *t* = 2*c*; в) *t* = 4*c*; г) *t* = 6*c*; д) *t* = 8*c*

Рис. 2 – Относительное давление метана и рост полости выброса

На рис. 2 показаны изолинии относительного давления метана и рост полости выброса в различные моменты времени. Видно, что в момент взрыва в зоне взрывания шпуровых зарядов давление образующихся газов превосходит давление метана в нетронутом массиве. Одновременно происходит резкое снижение давления метана в пространстве между плоскостью забоя и плоскостью взрывания – образуется полость с глубиной, приблизительно равной $l_ш$, рис. 2а.



а) t = 0,2c; б) t = 2c; в) t = 4c; г) t = 6c; д) t = 8c

Рис. 3 – Изменение значений коэффициента проницаемости

Откол угля и породы вызывает мгновенное обнажение новой поверхности забоя. Минимальная компонента тензора напряжений на этой поверхности равна нулю, а в непосредственной близости к ней еще сохраняются значительные сжимающие напряжения области опорного давления. Это обуславливает возникновение высоких градиентов напряжений на контуре образованной полости.

Кроме этого, большая площадь вновь образованной поверхности, высокие значения коэффициента проницаемости приконтурной части угольного пласта, рис. 3б-г, вызывают интенсивную десорбцию метана. Скорости фильтрации в этой зоне резко возрастают, газ начинает отрывать отделенные трещинами кусочки (пластинки) угля, обнажается следующий поверхностный слой – и весь процесс повторяется снова. Другими словами, происходит развитие самоподдерживающегося процесса выброса угля и метана, спровоцированного взрывом.

Из расчетов следует, что время протекания динамического процесса – 7 *с*. В течение этого времени градиенты давления принимают очень высокие значения. Происходит образование полости выброса в угольном пласте, длина которой достигает 6,6 *м*. Затем рост полости останавливается (рис. 2д, 3д), скорости течения метана падают, давление метана в угольном пласте продолжает медленно снижаться, исчезает зона высокой проницаемости на фронте выброса (рис. 3д) – геомеханические процессы и процесс течения газа возвращаются к квазистационарному режиму.

Можно заметить, рис. 2г-д, что давление метано-воздушной смеси внутри полости выброса в течение процесса выброса увеличивается с 0,1 до 3 МПа. Это происходит из-за частичного или полного перекрытия поперечного сечения выработки массой разрушенного угля, временного повышения давления воздуха в самой выработке. Изменение граничных условий – повышение давления метана на контуре полости выброса – является одним из условий затухания процесса выброса угля и газа, что отмечал и автор книги «Динамика выбросов угля, породы и газа» [6] – докт. техн. наук, профессор Шевелев Г.А.

На рис. 4 показано изменение значений коэффициента проницаемости на фронте выброса при буровзрывном способе проходки. По кривым проницаемости отчетливо прослеживается деление процесса на стадии инициирования (кривые t = 0,2 *с* и t = 1 *с*), протекания выброса (кривые t = 2-7 *с*) и его затухания (кривые t > 7 *с*). Также видно, что на расстоянии 0,1-0,3 *м* от свободной поверхности фронта выброса происходит значительное увеличение фоновой проницаемости.

Экспериментальными наблюдениями [7] подтверждается, что в период протекания выброса у поверхности обнажения существует и перемещается вместе с ней зона разрушения, в пределах которой система образующихся трещин нормально ориентирована к направлению развития выброса. По данным экспериментальных наблюдений глубина ее составляет 0,3-0,5 *м*.

Сравним полученные распределения проницаемости на фронте выброса при проходке выработки буровзрывным способом с данными по проницаемости на фронте выброса при проходке комбайном [8], рис. 5.

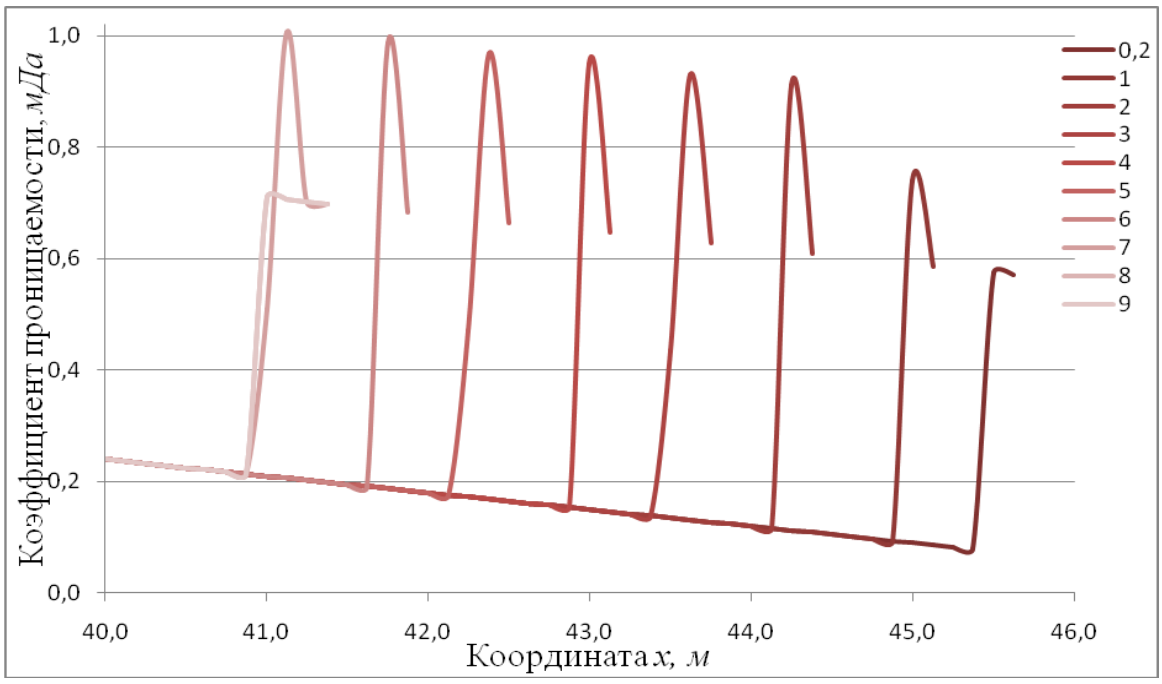


Рис. 4 – Значения коэффициента проницаемости массива в угольном пласте на фронте выброса в различные моменты времени (положение забоя – x = 47,75 *м*)

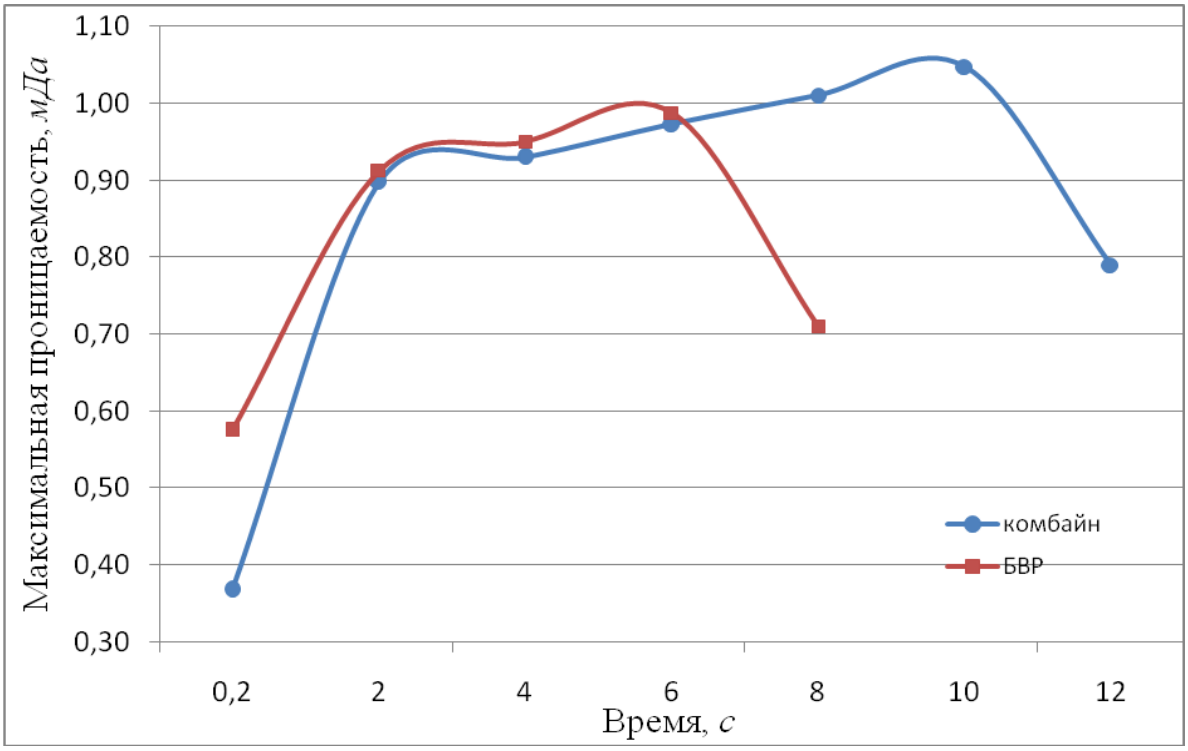


Рис. 5 – Сравнение проницаемости на фронте выброса при комбайновом и буровзрывном способе проходки

Из рисунка видно, что при прочих равных условиях кривые изменения максимальной проницаемости на фронте выброса имеют значительные отличия:

- время протекания выброса при БВР уменьшается на 4 с за счет сокращения второй стадии – стадии протекания процесса, при этом время инициации и затухания остается неизменным;

- проницаемость в начальный период процесса выброса при БВР в 1,56 раза выше за счет влияния действия взрыва.

На рис. 6 показано изменение давления метана в угольном пласте перед забоем в течение времени протекания выброса при буровзрывном способе проходки.

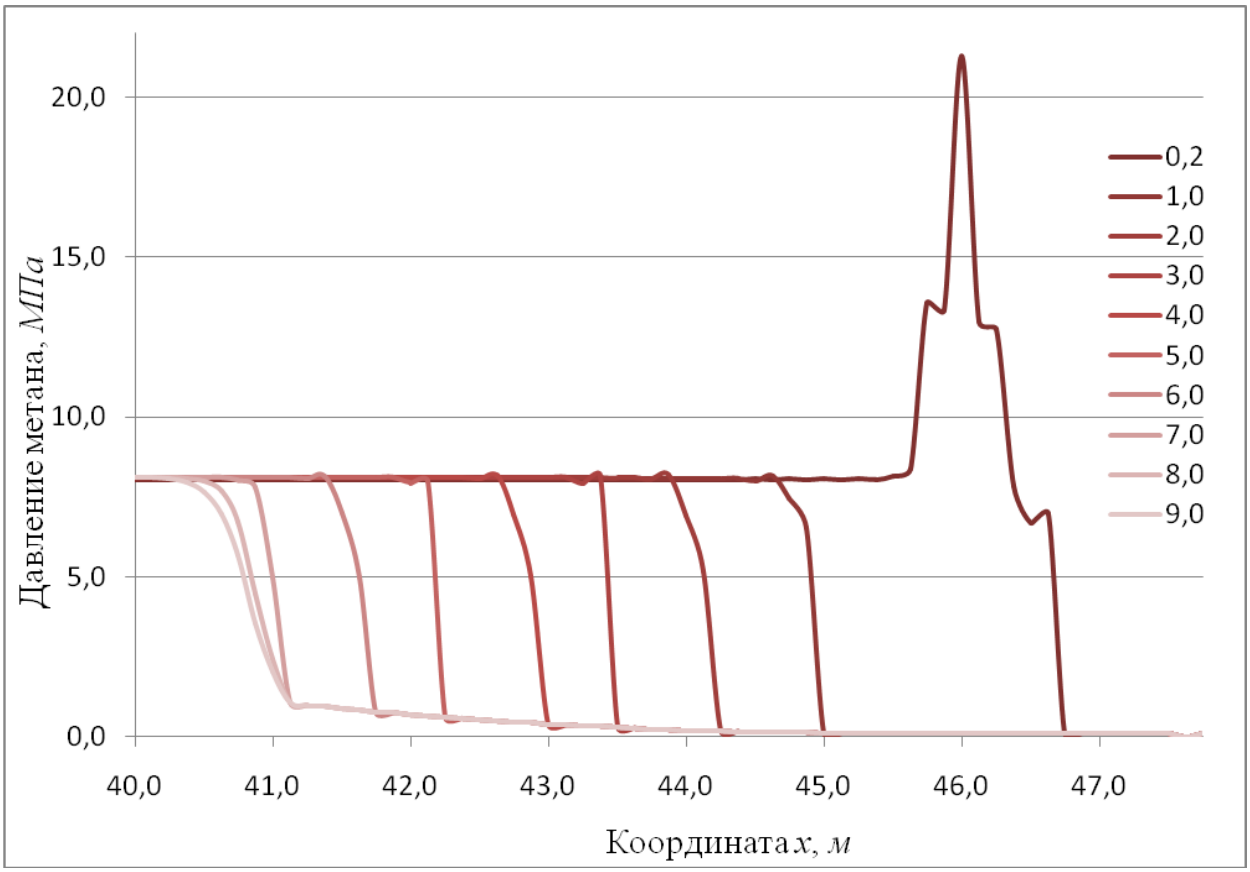


Рис. 6 – Изменение давления метана в угольном пласте перед забоем в различные моменты времени (положение забоя – x = 47,75 *м*)

В момент времени t = 0,2 наблюдается резкий скачок давления газа, вызванный взрыванием шпуровых зарядов. За счет практически мгновенного образования большого количества газа при химическом превращении вещества во время взрыва возникает большое давление на стенки шпура. Создается огромный градиент давления газа, совершающий работу по отрыву и выносу кусков угля и породы в пространство выработки.

Далее, в течение основного времени протекания процесса (t = 2-7 *с*) давление метана резко падает с 8 *МПа* в глубине массива до 0,1-2 *МПа* на вновь образованной свободной поверхности полости выброса. Причем такое резкое падение давления происходит на протяжении всего лишь 0,15 *м*, что говорит об огромной величине градиентов давления метана и на этом временном проме-

жутке. Большой перепад давления обуславливает развитие скоростей течения метана, достаточных для разрыва расслоившегося угля на мелкие пластинки и выноса их на большие расстояния вглубь выработки.

На стадии затухания, при t = 8 и 9 *с*, кривые давления метана заметно выполаживаются, величина градиентов давления метана уменьшается на порядок за счет увеличения давления газа внутри образованной полости и протяженности отрезка, на котором происходит перепад давления.

Сравнивая полученные распределения давления метана на фронте выброса при проходке выработки буровзрывным способом с такими же данными при проходке комбайном, увидим, что отличаются они только продолжительностью процесса, как уже отмечалось выше, и наличием пика давления в момент времени t = 0,2 *с*.

На рис. 7 показано изменение скоростей течения метана в угольном пласте перед забоем в течение времени протекания выброса при буровзрывном способе проходки.

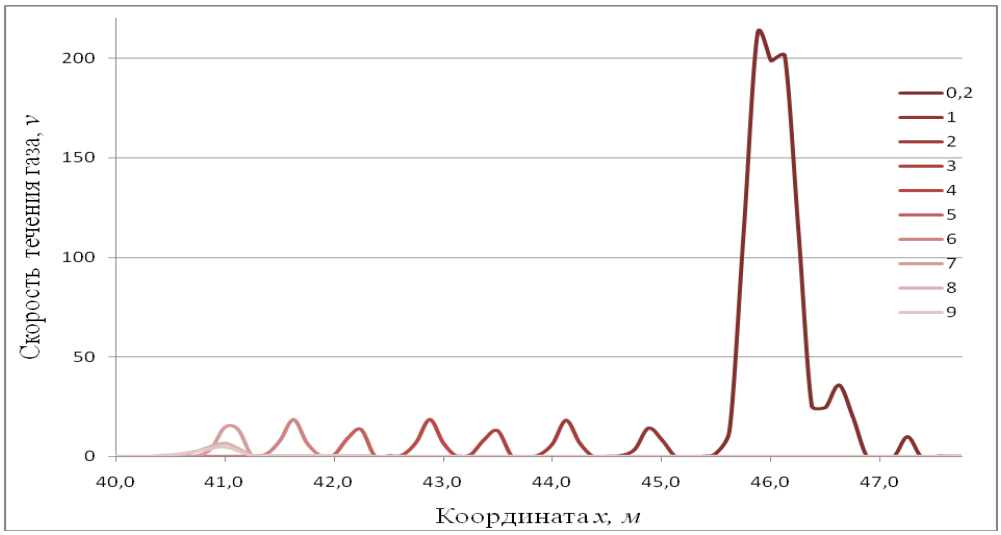


Рис. 7 – Изменение скоростей течения метана в угольном пласте перед забоем в различные моменты времени (начальное положение забоя – x = 47,75 *м*)

Видно, что в момент времени t = 0,2 происходит резкое увеличение скоростей течения метана, обусловленное высокими значениями градиентов давления газа при взрывании шпуровых зарядов. Практически мгновенно образованное при химическом превращении вещества во время взрыва большое количество газа с большой скоростью устремляется в возникающие трещины, расширяя их, разрывая уголь и совершая работу по отрыву и выносу кусков угля и породы в пространство выработки.

На этапе затухания угол наклона кривых уменьшается, максимальная скорость течения метана на фронте выброса уменьшается в 4 раза.

Сравним полученные графики скоростей течения метана на фронте выброса при проходке выработки буровзрывным способом с данными по скоростям

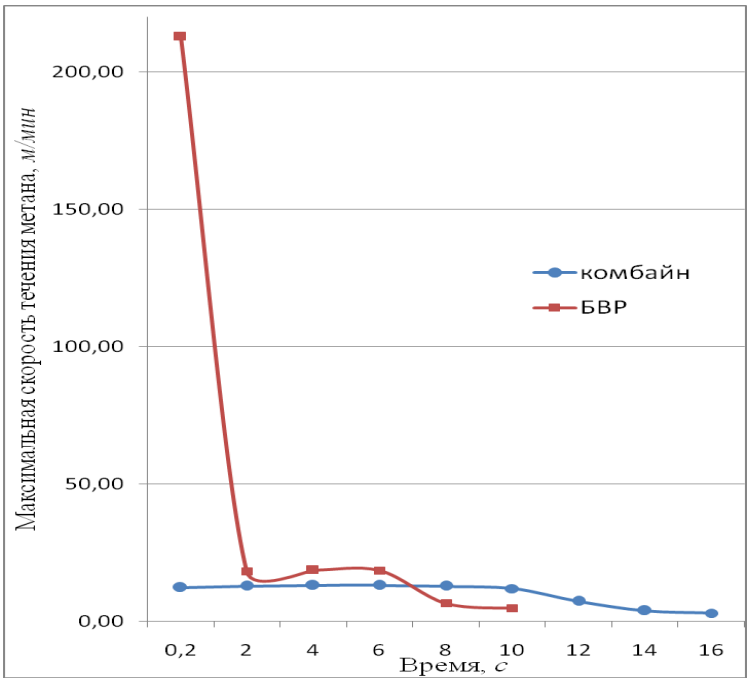


Рис. 8 – Сравнение скоростей течения метана на фронте выброса при комбайновом и буровзрывном способе проходки

при проходке комбайном, рис. 8. Из рисунка видно, что при прочих равных условиях кривые изменения максимальных скоростей течения газа на фронте выброса имеют следующие отличия:

– время протекания выброса при БВР уменьшается на 4 с – процесс выброса протекает быстрее и имеет большую интенсивность;

– максимальные скорости течения газа в начальный период процесса выброса при БВР выше в 17,3 раза выше за счет влияния действия взрыва;

– максимальные скорости в период протекания процесса выброса при БВР выше в 1,4 раза;

– максимальные скорости в период затухания процесса выброса при БВР также остаются более высокими – в 1,3 раза.

Другими словами, процесс выброса при проходке выработки буровзрывным способом протекает быстрее и имеет большую интенсивность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Формирование выбросоопасных зон в углепородном массиве и способы предотвращения выбросоопасности на шахтах / А. И. Жаров , Н. Н. Красюк, А. В. Ремезов [и др.]. – Кемерово : Кузбассвузиздат, 2006. – 92 с.

2. Каталог внезапных выбросов угля и газа на шахтах./ ВНИИ горн. геомеханики и маркшейд. дела, Укр. фил. – Л. : ВНИМИ, 1989. – 195 с.

4. Боровиков В. А. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород / В. А. Боровиков, И. Ф. Ванягин. – М. : Недра, 1990. – 231 с.

5. Круковская В. В. Изучение параметров процесса выброса угля и газа с использованием компьютерного моделирования / В. В. Круковская // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XVII Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2008. – С. 152 – 154.

5. Ефремов Э. И. Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах /Э. И. Ефремов, В. Н. Харитонов, И. А. Семенюк. – М. : Недра, 1979. – 256 с.

6. Шевелев Г. А. Динамика выбросов угля, породы и газа / Г. А. Шевелев.– К. : Наук. думка, 1989. – 160 с.
7. Трифонова Н. В. О закономерностях изменения газодинамических параметров зоны разрушения в процессе выброса /Н.В. Трифонова // В сб. Выбросы угля, породы и газа. – К. : Наукова думка, 1976. – С. 60 – 64.
8. Круковская В. В. Изменение проницаемости угля и параметров течения метана на фронте выброса / В. В. Круковская // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – Вып. № 78. – С. 34 – 42.

УДК 622.01.013

Д-р геол. наук В.А. Баранов
(ИГТМ НАН Украины)

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА ПОРИСТОСТЬ ПЕСЧАНИКОВ ДОНБАССА

Визначені графічні закономірності впливу структури на відкриту пористість в пісковиках Донбасу. Показано зменшення пористості з південного заходу на північний схід басейну.

INFLUENCE OF STRUCTURE ON POROSITY OF SANDSTONES OF DONBASS

Certain graphic conformities to the law of influencing of structure on the opened porosity in sandstones of Donbass. Diminishment of porosity from a south-west on the north-east of pool is shown.

Коллекторские свойства осадочных пород стали предметом пристального внимания ученых после двух мировых войн, показавших однозначное преимущество военной техники противоборствующих сторон. Нефть, а позже газ, стали новыми и необходимыми энергоисточниками. Техника за несколько десятилетий перешла с угля и дров, на бензин и керосин. Первым на территории нашей республики был освоен Прикарпатский нефтегазовый бассейн, в 30-х годах 20-го века. Вторая половина этого века характеризуется небывалым подъемом технического развития особенно ведущих стран, а для этого нужно было много энергоносителей. Затраты на поиск, разведку и добычу энергоносителей как сто лет назад, так и сейчас, составляют до 70-80 % от всех затрат на геологию.

Тот факт, что ученые все чаще называют Донбасс газоугольным или углегазовым, говорит сам за себя. Интерес к энергоисточникам разных видов усиливается и работы в этом направлении ведутся достаточно интенсивно. С учетом перехода Донецкого угольного бассейна, в новый статус – углегазовый, перед учеными формулируются новые задачи, в круг которых входит исследование коллекторских свойств терригенных отложений указанного бассейна, характеризующегося (относительно других осадочных бассейнов) повышенной плотностью пород, пониженной проницаемостью и пористостью. Последние факторы особенно серьезно влияют на темпы освоения бассейна как газоносного. В этой связи исследование изменения свойств пород Донбасса в стратиграфическом разрезе и на площади, определение новых закономерностей, является проблемой актуальной как в научном, так и в прикладном значении.

Ранее были опубликованы результаты исследований изменения газоносности в разных районах [1]; формирование нового вида пористости «текстурной пористости», характерной для угольных месторождений [2]; изменение газоносности с глубиной [3]; связь газоносности с катагенезом [4].