

5. Барбашова Г.А. Определение гидродинамической нагрузки на стенку нефтяной скважины, формируемой электрическим разрядом / Г.А. Барбашова, В.М. Косенков // ПМТФ. - 2001. - Т.42, № 6. - С. 93.
6. Косенков В.М. Резонансные колебания цилиндрической стенки разрядной камеры в результате электрического разряда в воде/ В.М. Косенков // ПМТФ. - 2011. - № 4. - С.43-51.
7. Косенков В.М. Развитие пробоя в воде/ В.М. Косенков, Н.И. Кускова // ЖТФ. - 1987. - Т.57, Вып.10. - С. 17-20.
8. Косенков В.М. Влияние длины канала высоковольтного разряда в воде на эффективность пластического деформирования цилиндрической оболочки / В.М. Косенков // ЖТФ. - 2011. - Т. 81, № 10. - С.133-139.
9. Александров П. А. Механические свойства материалов в магнитном поле. Сер. "Термоядерный синтез" / П. А. Александров // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. - Вып. 1. - С. 24-30.
10. Головятинский С. А. Модификация поверхности полимеров импульсной плазмой атмосферного давления. Серия фізична "Ядра, частинки, поля"/ С. А. Головятинский // Вісник Харківського університету. – 2005, Вип. 2/24. – С. 80-86.
11. Слуцкер А. И. Влияние механического нагружения на кинетику электрического разрушения полимеров / А. И. Слуцкер // Журнал технической физики. – 2008.-Т. 78, Вып. 11. – С. 60-63.

**УДК 622.411.332.023.623:622.83**

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ СВЯЗАННОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА И ФИЛЬТРАЦИИ МЕТАНА**

Виконано чисельне моделювання зв'язаних процесів зміни напружено-деформованого стану гірських порід та фільтрації метану у порушеному вуглепородному масиві навколо вибою гірничої виробки. Результати розрахунку порівняно з результатами розв'язання окремих задач зміни у часі геомеханічних і фільтраційних параметрів. Проаналізовано вплив кожного з процесів на загальний результат та визначено ступінь зв'язку розглянутих процесів.

## **DEGREE OF RELATIONSHIP OF PROCESSES CHANGES THE ROCK MASS STRESS STATE AND METHANE FILTRATION INVESTIGATION**

Numerical modeling of coupled processes of rock stress-strain state change and methane filtration in disrupted coal-rock massif around mine face working is completed. The calculation results are compared with the results of solving separate problems of changes of geomechanical and filtration characteristic in time. The influence of each of this processes on the general result is analyzed and the degree of relationship above processes is defined.

В качестве одного из основных методов теоретического исследования сложных прикладных проблем в настоящее время все чаще используется так называемый вычислительный эксперимент. Суть этого метода состоит в том, что на основе математической модели в результате непосредственного численного решения соответствующих уравнений количественно определяется поведение изучаемого объекта в тех или иных условиях [1]. Сравнение результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными позволяет оценить эффективность математической модели, определить необходимые константы и параметры и добиться ее адекватности рассматриваемому явлению. На основе прошедшей такую проверку модели можно прогнозировать поведение исследуемого объекта в условиях, недостижимых в натурном эксперименте.

Зачастую изучаемое явление состоит из нескольких процессов, происходящих в массиве горных пород при подземной добыче угля (изменение НДС твердого тела, диффузия и фильтрация жидкости и газа, десорбция газа, теплофизические и химические процессы) и оказывающих влияние один на другой. Степень этого влияния может быть различной. Например, при расчете параметров напряженного состояния можно пренебречь изменением температуры по-

род на различной глубине, так как в данном случае процесс теплового расширения очень незначительно влияет на распределение значений геомеханических параметров. А при моделировании процесса выброса угля и метана нельзя исключать из системы ни один из связанных процессов изменения НДС, фильтрации и десорбции метана – математическая модель потеряет свою результативность.

В каких же случаях при математическом моделировании нужно учитывать все происходящие процессы? Какими из них и когда можно пренебречь для упрощения задачи? Каков критерий оценки степени влияния каждого их происходящих в исследуемой области процессов на общий результат? Для решения этих задач было проведено исследование степени связанности различных процессов, происходящих в массиве при ведении горных работ. В данной работе рассмотрено протекание связанных процессов изменения НДС массива и фильтрации метана при проведении горной выработки по газоносному пласту и определена степень влияния каждого из составляющих процессов на общий результат.

Основные параметры, характеризующие протекание этих процессов, показаны в табл. 1, где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  – максимальная и минимальная компоненты тензора главных напряжений;  $\gamma$  – удельный вес вышележащих пород;  $H$  – глубина разработки.

Таблица 1 – Параметры, характеризующие изменение НДС массива и процесс фильтрации метана

Процесс	Параметр	Физический смысл параметра	Ед. изм.
Изменение НДС массива (НДС)	$\sigma_1/\gamma H$	максимальная компонента тензора главных напряжений	–
	$Q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H}$	характеризует разнокомпонентность поля напряжений	–
	$P = \sigma_3/\gamma H$	характеризует степень разгрузки поля напряжений от горного давления	–
Фильтрация метана (Ф)	$P$	давление метана	МПа
	$V$	скорость фильтрации метана	м/мин

Для исследования степени связанности этих процессов решим три задачи:  
- в полной постановке (НДС+Ф) [2]:

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = 0; & T_i(t) = -c \frac{\partial u_i}{\partial t}; \\ \mu_2 \frac{\partial p}{\partial t} + K \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q(t) = 0; & K = f(\sigma_{ij}, t); \end{cases}$$

где  $\sigma_{ij,j}$  – производные от компонент тензора напряжений по  $x$ ,  $y$ ;  $t$  – время;  $X_i(t)$  – внешние силы;  $T_i(t)$  – силы, вызванные внутренним трением;  $P_i(t)$  – силы, обусловленные давлением газа;  $c$  – коэффициент демпфирования, опре-

деляемый экспериментально;  $u_i$  – перемещения;  $p$  – давление газа;  $q$  – интенсивность источников газовой выделения;  $K$  – коэффициент проницаемости;  $\mu_2$  – вязкость газа; – расчет параметров напряженного состояния без учета сил давления газа в трещинно-поровом пространстве (НДС):

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = 0; \quad T_i(t) = -c \frac{\partial u_i}{\partial t};$$

- расчет параметров фильтрации метана без учета НДС массива (Ф):

$$\mu_2 \frac{\partial p}{\partial t} + K \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q(t) = 0; \quad K = const.$$

Начальные и граничные условия:

$$p|_{t=0} = p_0, \quad p_0 = 0,8 * \gamma_e H;$$

$$p|_{\Omega_1} = p_0;$$

$$p|_{\Omega_2} = p_v; \quad p_v = 0,1 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H;$$

$$\sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H;$$

$$\sigma_{zz}|_{t=0} = \lambda \gamma H;$$

$$u_x|_{\Omega_3} = 0;$$

$$u_y|_{\Omega_4} = 0;$$

где  $p_0$  – давление метана в момент времени  $t = 0$ ;  $\gamma_e$  – плотность воды;  $\Omega_1$  – изменяющаяся во времени граница области фильтрации;  $\Omega_2$  – внутренний контур (выработка);  $p_v$  – давление метано-воздушной смеси в выработке;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора;  $\Omega_3$  – вертикальные границы внешнего контура;  $\Omega_4$  – горизонтальные границы внешнего контура.

Затем полученные массивы данных сравним попарно в значащей области, рис. 1, которая в данном случае отстоит от забоя выработки вверх, вниз, вправо и влево на расстояние, равное высоте выработки:

1) для процессов НДС+Ф и НДС массивы параметров  $\sigma_i$ ,  $Q$  и  $P$ ;

2) для процессов НДС+Ф и Ф массивы параметров  $p$  и  $V$ .

Общий процесс (НДС+Ф) будем обозначать  $\Pi$ , составляющие процессы при раздельном их рассмотрении НДС –  $\Pi_1$ , Ф –  $\Pi_2$ , параметры этих процессов соответственно –  $n$ ,  $n_1$  и  $n_2$ . В качестве критерия, характеризующего влияние процесса  $\Pi_1$  на общий результат  $\Pi$ , возьмем

$$\Delta\Pi \approx \Pi \approx \frac{\sum_{i=1}^N |n_i - n1_i|}{N};$$

где  $N$  – количество элементов в области сравнения, рис. 1.

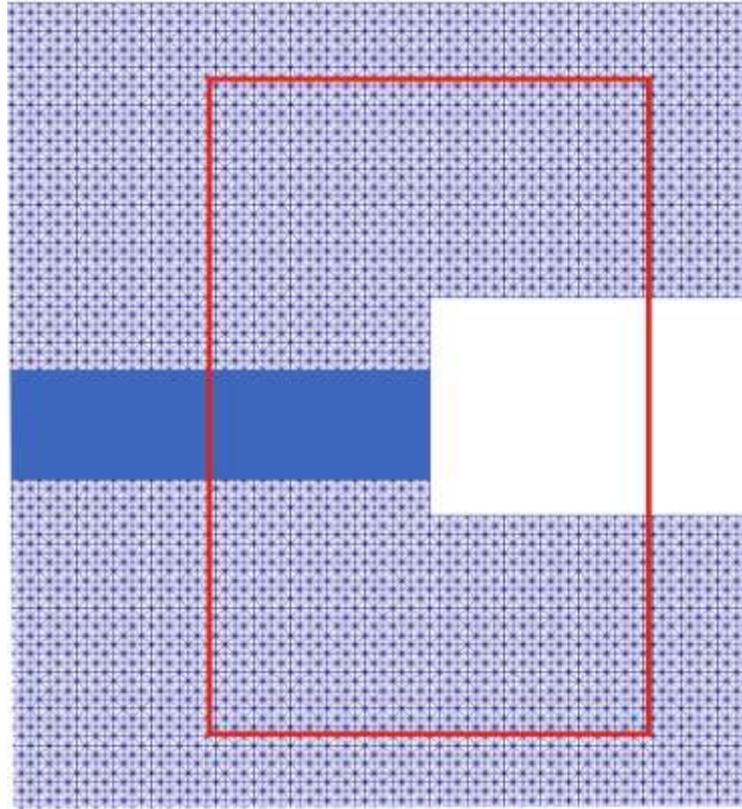


Рис. 1 – Область сравнения параметров

В результате расчетов получим данные сравнения на различных временных итерациях, рис. 2 и 4.

Из рис. 2 видно, что влияние учета давления газа на результат расчета напряженного состояния не превышает 10 %:

$$\Delta\Pi \approx \Pi \approx < 10\%.$$

Менее всего пластовое давление метана влияет на изменение максимальной компоненты тензора главных напряжений, которое не превышает 4% в течение рассмотренных 100 итераций. Наибольшее влияние учет давления метана оказывает на параметр  $P$ , характеризующий степень разгрузки поля напряжений от горного давления, рис. 3.

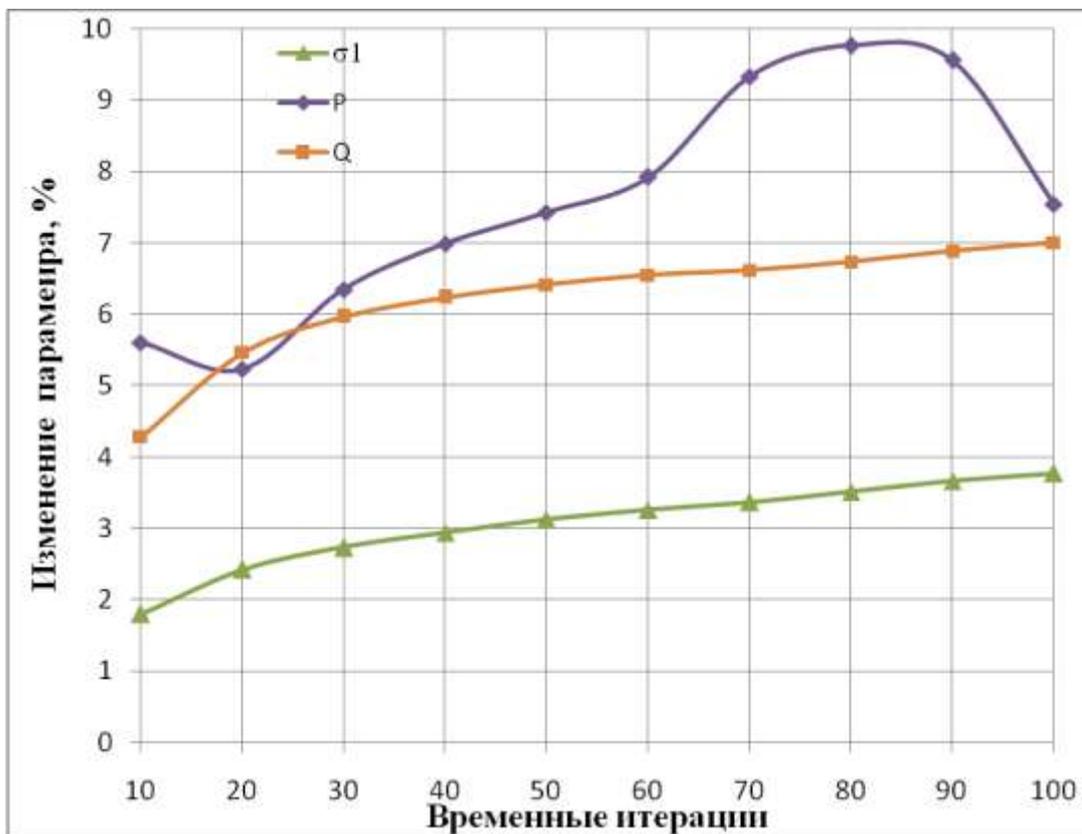
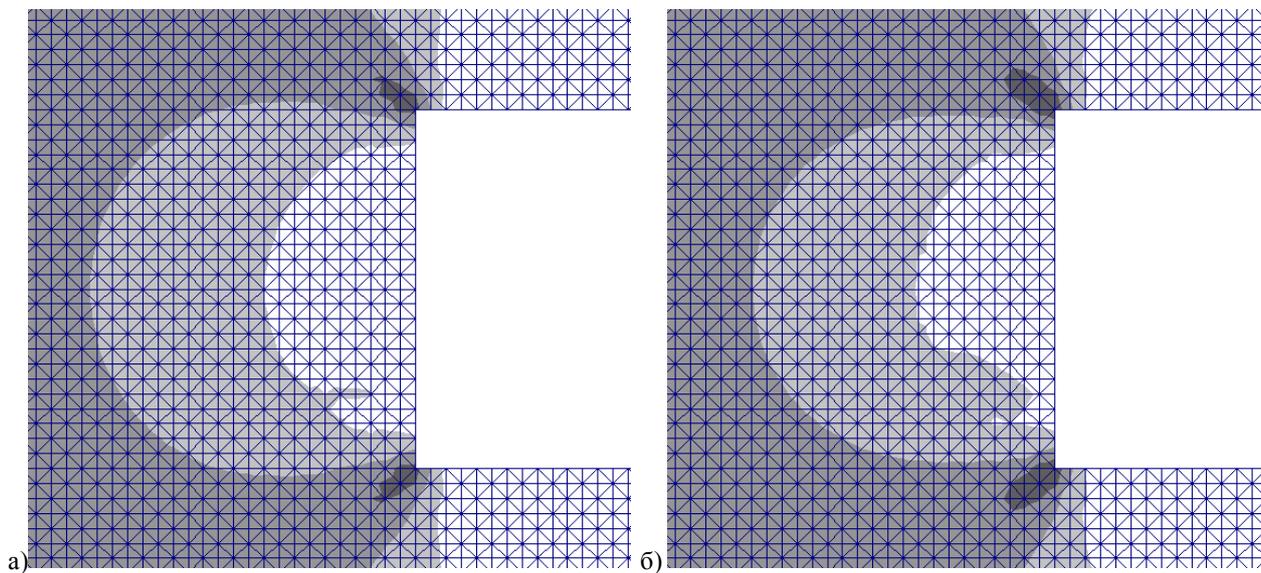


Рис. 2 – Изменение параметров  $\sigma_1$ ,  $Q$  и  $P$  для процессов НДС+Ф и НДС



а) процесс НДС+Ф; б) процесс НДС.

Рис. 3 – Распределение значений параметра  $P$ , 80 итерация

Во всех трех случаях изменение параметров происходит по параболическому закону, с погрешностью  $\delta$ , не превышающей 10%:

$$\Delta = a \cdot 0,1i^2 + b \cdot 0,1i + c,$$

где  $i$  – временная итерация;  $a, b, c$  – постоянные, определяемые по табл. 2.

Таблица 2 – Постоянные  $a, b$  и  $c$  для функции регрессии и погрешность аппроксимации

Параметр	$A$	$b$	$c$	$\delta, \%$
$\sigma_1$	-0,019	0,405	1,574	2,42
$Q$	-0,068	1,188	3,656	8,46
$P$	-0,040	0,683	4,001	2,74

Таким образом, процесс изменения НДС массива в этой паре процессов является основным, учет давления метана, содержащегося в трещиновато-поровом пространстве, влияет на изменение параметров напряженного состояния незначительно, это влияние находится в пределах погрешности расчета, менее 10%.

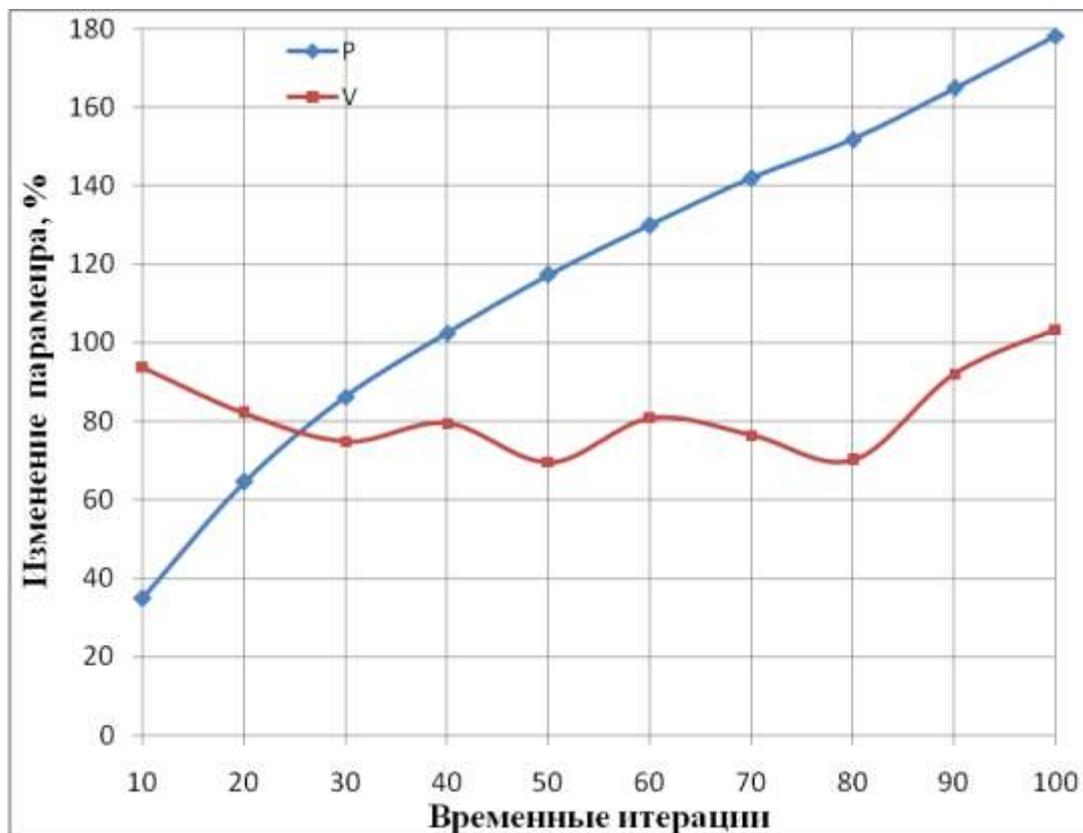


Рис. 4 – Изменение параметров  $p$  и  $V$  для процессов НДС+Ф и Ф

Из рис. 4 видно, что учет напряженного состояния при расчете области фильтрации и коэффициентов проницаемости в ней значительно воздействует на результаты расчета параметров фильтрации метана:

$$\Delta \Pi \approx 60\%.$$

Сильнее всего изменение НДС массива влияет на погрешность расчета давления метана, рис. 5, которая постепенно возрастает и в течение рассмотренных 100 итераций достигает значения 160%. Это происходит из-за равномерного распределения проницаемости по всей исследуемой области ( $K = const$ ) и отсутствия границ области фильтрации, которые невозможно рассчитать без учета геомеханики образования области фильтрации.

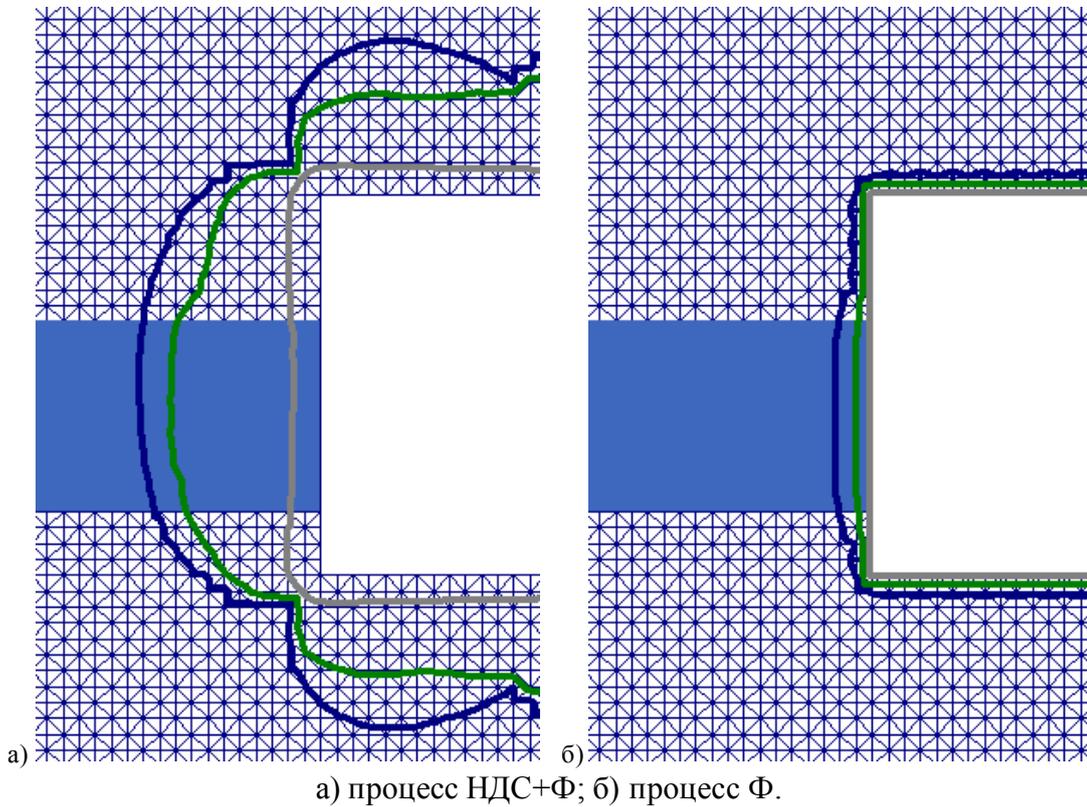


Рис. 5 – Изобары относительного давления метана, 30 итерация

Погрешность расчета поля скоростей фильтрации  $V$  при исключении из системы данных связанных процессов процесса изменения поля напряжений, рис. 4, колеблется около значения 100% в течение рассмотренного периода времени, что также говорит о высокой степени зависимости этого параметра от учета геомеханического фактора.

В этих случаях изменение параметров происходит по экспоненциальному закону, с погрешностью  $\delta$ , не превышающей 10%:

$$\Delta = \exp \left[ a \ln^2 \left( 0,1i \right) + b \ln \left( 0,1i \right) + c \right],$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – постоянные, определяемые по табл. 3.

Таблица 3 – Постоянные  $a$ ,  $b$  и  $c$  и погрешности аппроксимации

Параметр	$A$	$b$	$C$	$\delta, \%$
$p$	-0,089	0,895	3,565	1,52
$V$	0,183	-0,449	4,574	7,13

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что процесс фильтрации метана в этой паре процессов является зависимым от основного процесса изменения НДС массива вокруг выработки, отсутствие учета геомеханики формирования области фильтрации при расчете фильтрационных параметров приводит к значительной погрешности расчета, превышающей 100%. Другими словами, если конечной целью моделирования является изучение напряженно-деформированного состояния газонасыщенного углеродного массива, то процесс фильтрации метана можно не принимать во внимание и газовую со-

ставляющую в уравнении (1) не учитывать. Если же предмет исследования – процесс фильтрации метана, то изменением НДС вмещающего выработку массива пренебрегать нельзя.

Таким образом, влияние одного из связанных процессов на общий результат можно оценить, используя критерий  $\Delta$ , характеризующий изменение параметров при исключении этого процесса из общей системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метод конечных элементов в задачах газонефтепромысловой механики / В.Н. Аликии, И.Е. Литвин, С.М. Щербаков, В.П. Бородавкин. – М.: Недра, 1992. – 288 с.
2. 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. XVIII Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2008. – С. 132-134.

УДК 621.3:622

Аспирант П.А. Брюханов  
(МакНИИ),  
д-р техн. наук В.Г. Шевченко  
(ИГТМ НАН Украины)

### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕГАЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫМИ СКВАЖИНАМИ ПОЗАДИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

Дано оцінку ефективності дегазації підземними свердловинами за діючим очисним вибоєм. Отримані результати дозволяють визначити раціональну глибину герметизації дегазаційних свердловин з урахуванням деформації гірського масиву й самих свердловин та її вплив на відносні витіки (підсмоктування), відносний дебіт метану, що витягається системою дегазації, коефіцієнт ефективності дегазації.

### **EVALUATION DEGASSING DOWNHOLE BEHIND OF STOPE**

The efficacy of the drainage of downholes behind existing stope. The results obtained allow to determine a rational depth germanium degasification downholes cross-breeding with the deformation of rock mass and own downholes and its effect on the relative leakage (choke), the relative yield of methane extracted degassing, degassing efficiency ratio.

Герметизация дегазационных скважин решает двойственную задачу: предотвращения подсосов воздуха по трещинам в систему шахтной дегазации и снижения концентрации метана, выдаваемого из шахты, и предотвращение утечек метана из-за его дренажа по трещинам и загазирования выработок по этой причине. При идеальной герметизации можно не считаться с подсосами воздуха и возможными загазированиями горных выработок. Наоборот, при недостаточной герметизации скважин снижается эффективность дегазации как системы поставки метана для использования потребителями, так и ухудшается взрывобезопасность и охрана труда при ведении технологических работ по добыче угля в шахте.

На рис. 1 показана полученная зависимость утечек из скважины от длины герметизации устья скважины.