

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРАЦИИ  
МЕТАНА ВО ВРЕМЕНИ ПРИ ОСТАНОВКЕ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

Виконано тривимірне чисельне моделювання фільтраційних процесів у порушеному вуглепородному масиві навколо вибою очисної виробки при зупинці лави під час ремонтних змін чи вихідних днів. Проаналізовано зміну у часі розподілів значень геомеханічних параметрів, відносного тиску метану у вугільному пласту, швидкостей фільтрації та дебіту метану до виробки.

**BEHAVIORS OF METHANE FILTERING PARAMETERS IN TIME  
TO STOPPING MINING FACE**

Executed three-dimensional computational modeling of filtration process a broken coal-rock massif around mining face at during a repair shift or day off. The time change of geomechanical parameters parameterization, relative methane pressure in coal bed, filtering rate and methane discharge is analysed.

На угледобывающих предприятиях применяются недельные режимы работы предприятия: прерывный с одним общевыходным днем, при котором шахта работает 6 дней, а работники – 5 дней [1]. Кроме этого, в течение суток очистные работы также ведутся в прерывном режиме, когда одна из четырех рабочих смен посвящена ремонтным работам. Во время ремонтных смен и выходных дней очистной забой остановлен, и выделение метана из угольного пласта и газоносных вмещающих пород приобретает другой характер. С целью выявления влияния прерывного режима работы добычных участков на напряженно-деформированное состояние вмещающих газоносных пород, процесс фильтрации метана в них и газовую обстановку в выработке проведем серию вычислительных экспериментов на нестационарной плоской модели связанных процессов геомеханики и фильтрации метана.

Изменение напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки, проницаемость среды и нестационарное движение газа в нарушенном массиве описываются системой уравнений [2]:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P(t) = \rho_n \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right), \quad i, j = x, y;$$

$$\frac{\mu_z}{\rho_z} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\mu_z}{\rho_z} q(t) = 0;$$

$$k = f(\sigma_{ij}, t)$$
(1)

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,  $T_i(t) = -c_g \partial u_i / \partial t$ ;  $c_g$  – коэффициент демпфирования, определяемый экспериментально;  $u_i$  – перемещения;  $P(t)$  – силы, вызванные давлением содержаще-

гося в порах и пустотах газа;  $\rho_n$  – плотность породы;  $\rho_2$  – плотность газа;  $\mu_2$  – вязкость газа;  $p$  – его давление;  $q(t)$  – интенсивность источников газовой выделенности;  $k$  – поле коэффициентов проницаемости пород.

Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора [3, 4]. Задача решается методом конечных элементов. Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma h; & p|_{\Omega_1(t)} &= 0,8 \cdot \gamma_{\text{воды}} h; \\
 \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma h; & p|_{\Omega_2} &= p_v; \quad p_v = 0,1 \text{ МПа}; \\
 \sigma_{zz}|_{t=0} &= \lambda \gamma h; & u_x|_{\Omega_3} &= 0; \\
 p|_{t=0} &= 0,8 \cdot \gamma_{\text{воды}} h; & u_y|_{\Omega_4} &= 0;
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\gamma$  – средний вес вышележащих горных пород;  $h$  – глубина разработки;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора;  $\gamma_{\text{воды}}$  – плотность воды;  $\Omega_1(t)$  – изменяющаяся во времени граница области фильтрации;  $\Omega_2$  – внутренний контур (выработка);  $\Omega_3$  – вертикальные границы внешнего контура;  $\Omega_4$  – горизонтальные границы внешнего контура;  $p_v$  – давление воздуха в выработке.

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  $\Delta t$  с помощью итерационных соотношений [5] получаем распределение искомых величин на момент времени  $t + \Delta t$ .

При расчетах учитывается, что наличие в поровом пространстве газа под высоким давлением влияет на напряженное состояние пород (силы  $P(t)$ ). Учитывается также и наличие обратной связи – под воздействием изменяющегося во времени поля напряжений определенным образом изменяется и проницаемость среды, влияя на процесс фильтрации и изменение давления метана.

Рассмотрим поперечное сечение очистного забоя, рис. 1. Серым цветом на рисунке выделен угольный пласт. Исследуем изменение геомеханических и фильтрационных параметров во времени, в течение ремонтной смены, после того, как остановлен очистной забой.

На рис. 2 показано распределение относительных значений минимальной компоненты тензора главных напряжений  $P = \sigma_3 / \gamma H$  на различных временных итерациях  $n_i$ , которые примерно соответствуют 1 мин.

Как видно из рис. 2а-в, на первых 40-60 итерациях после остановки забоя вокруг выработки происходит резкое перераспределение значений минимальных напряжений, которые характеризуют возможность возникновения хрупких деформаций (при  $P \approx 0$ ). Дальнейшее увеличение зоны  $P \approx 0$  носит более постепенный характер.

На рис. 3 показано изменение во времени разнокомпонентности поля главных напряжений  $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$ .

Как видим, зоны повышенной разнокомпонентности (на рисунках показаны более темным цветом) окружают забой выработки и продолжают развиваться в течение всего расчетного времени, равного двум часам. Этот процесс вызывает увеличение проницаемости пород и приводит к интенсификации фильтрационных процессов в окрестности выработки.

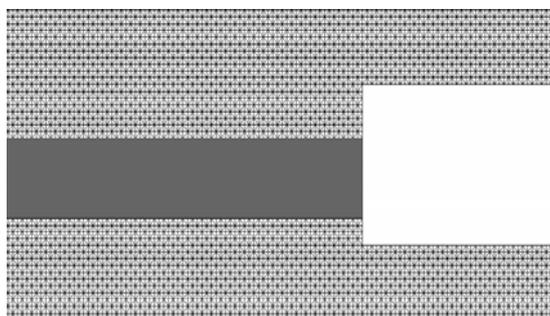


Рис. 1 – Центральный фрагмент конечно-элементной схемы, используемой при расчетах

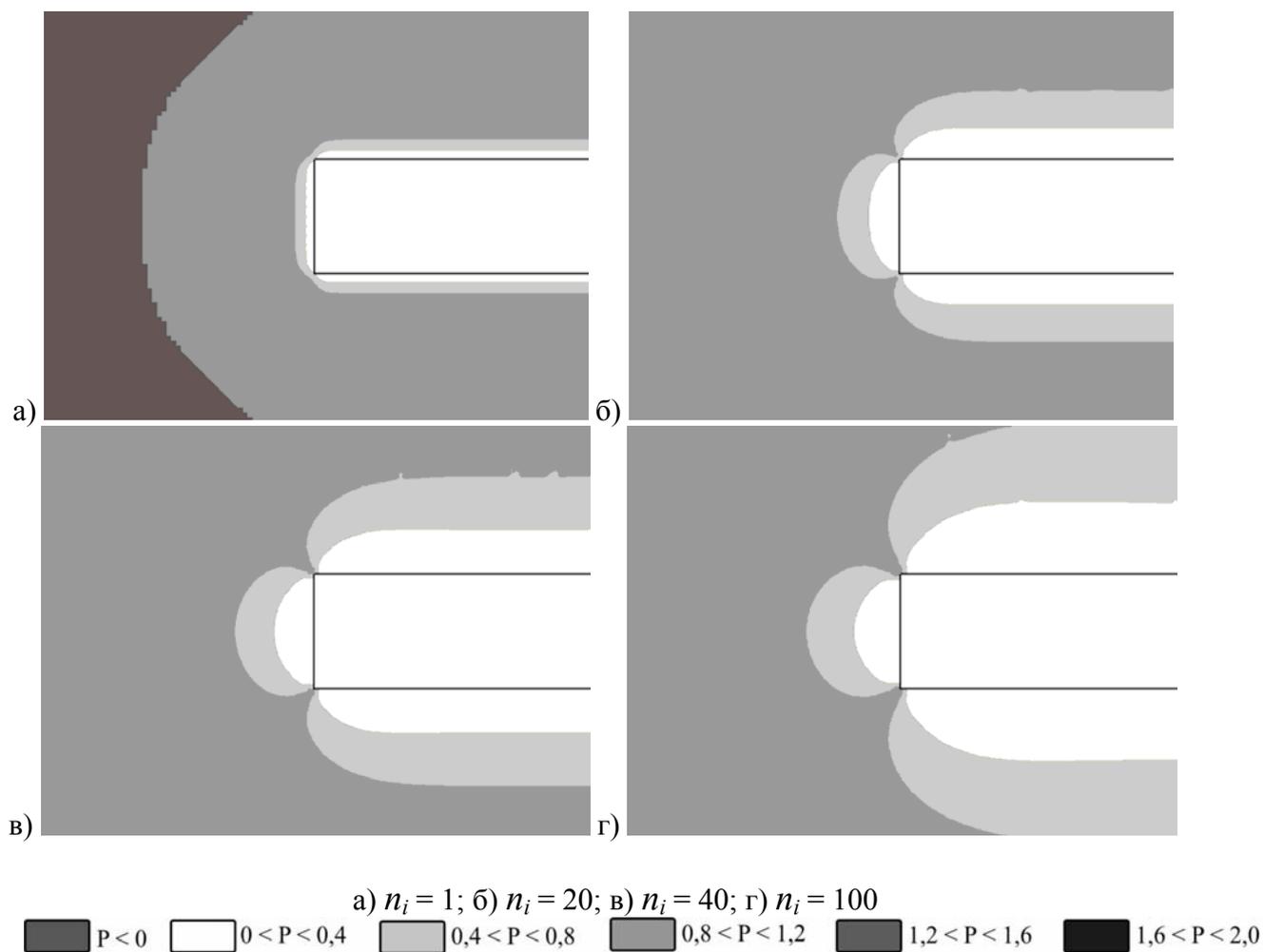


Рис. 2 – Распределение относительных значений минимальной компоненты тензора главных напряжений в различные моменты времени.

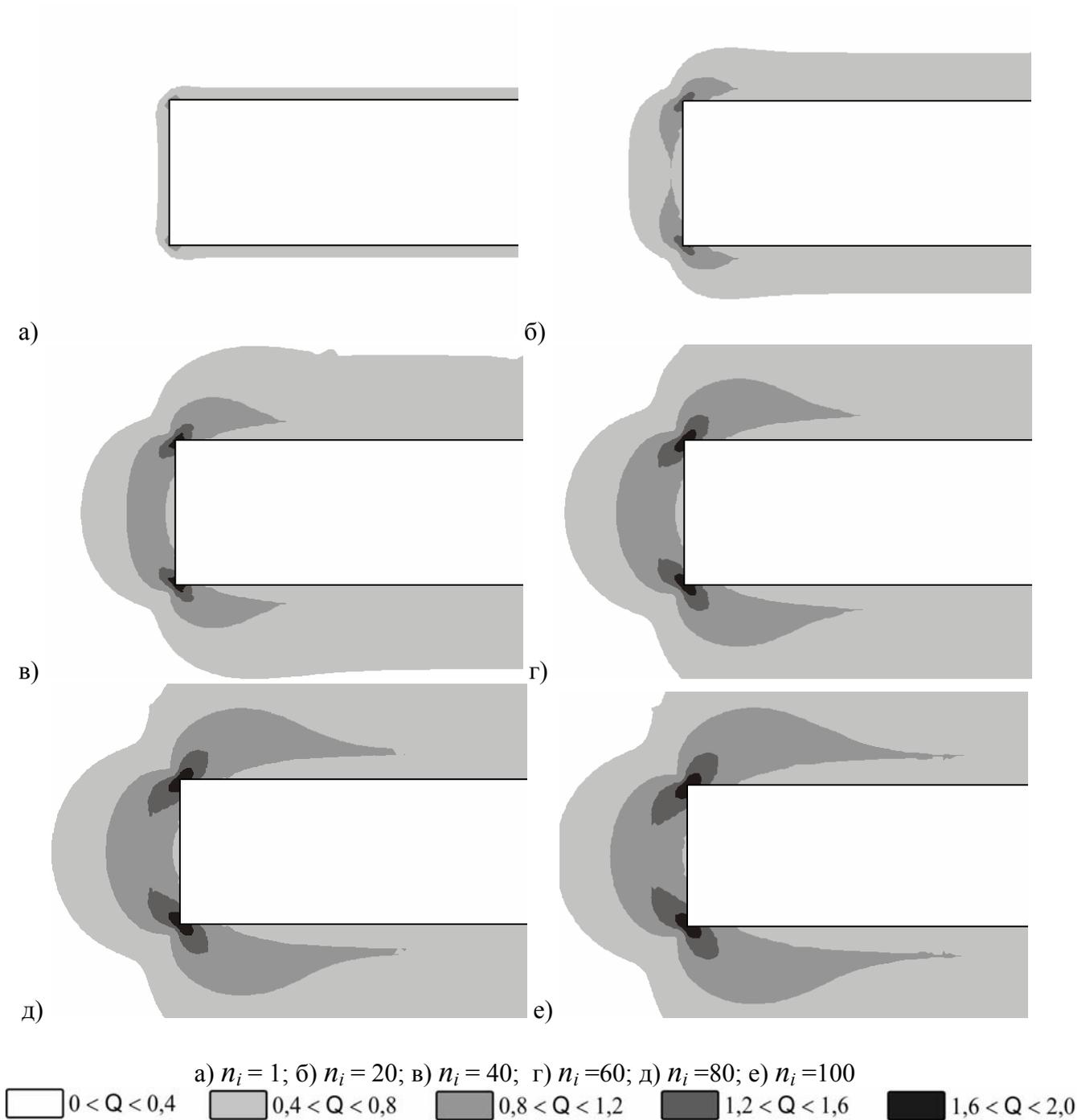


Рис. 3 – Распределение значений относительной разности максимальных и минимальных напряжений в различные моменты времени.

Область фильтрации метана постепенно увеличивается во времени согласно изменяющемуся полю напряжений. Понятно, что чем на более продолжительное время будут остановлены добычные (проходческие) работы, тем более обширную область захватит развивающаяся система трещин, которая позволит метану из угольного пласта и газоносных вмещающих пород перемещаться в атмосферу выработки.

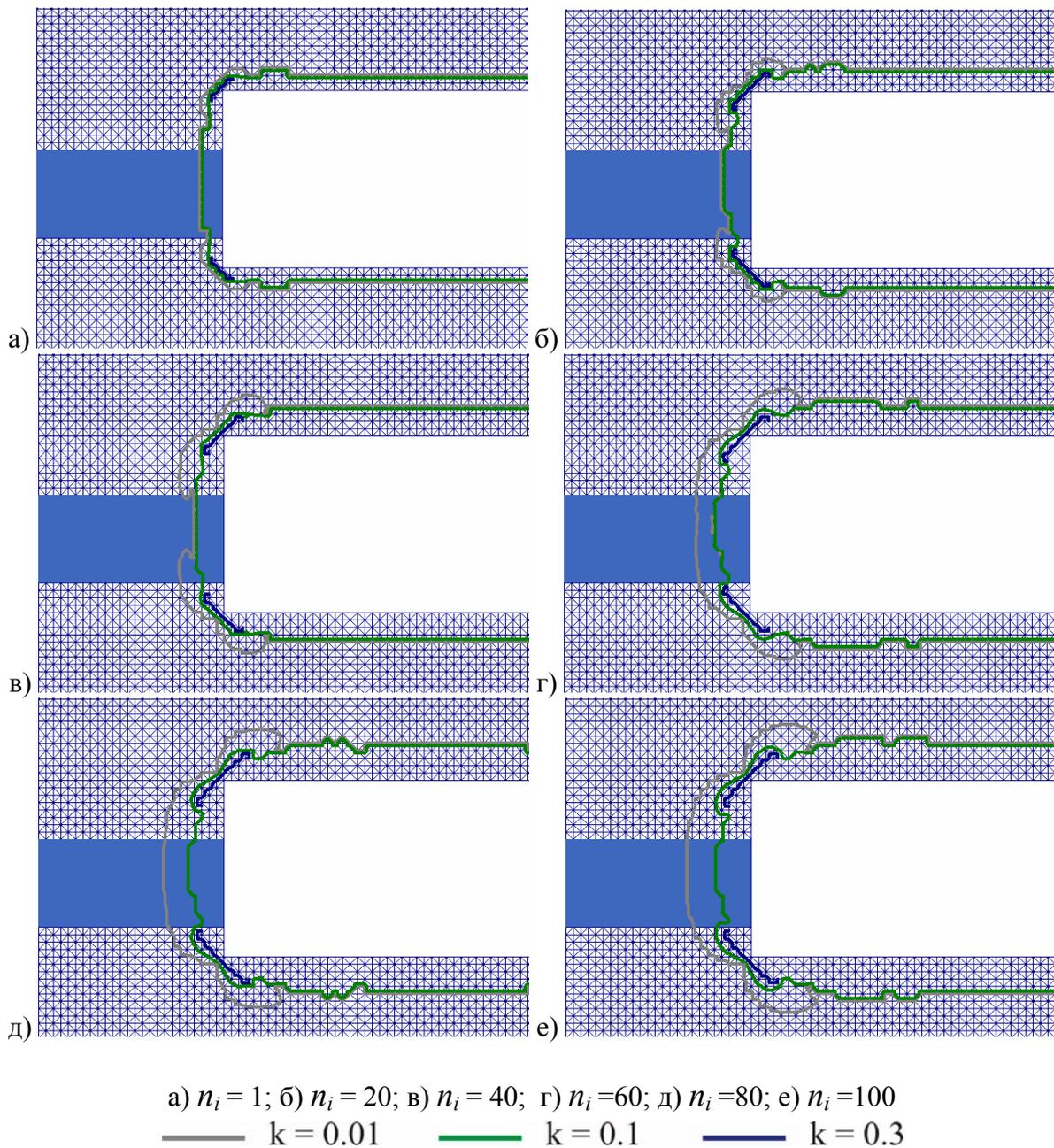


Рис. 4 – Распределение значений коэффициентов проницаемости в различные моменты времени.

На рис. 5 показано изменение распределения значений относительного давления  $p/p_0$  в различные моменты времени. Видно, что изобары пониженного давления со временем отступают вглубь массива, что говорит о постепенной дегазации вмещающих пород.

Теперь построим графики изменения значений давления метана, рис. 6, и скоростей его фильтрации, рис. 7, в угольном пласте с ростом расстояния до забоя выработки в различные моменты времени.

Видно, что кривые падения давления со временем выполаживаются. Если при  $n_i = 1$  давление падало с 8 МПа в нетронутом массиве до 0,1 МПа на линии забоя всего на протяжении 10 см, то при  $n_i = 40$  такое же падение давления происходит на протяжении 60 см, что уже в 6 раз больше. Более высокий градиент

давления (в первые моменты времени) обуславливает и более высокие скорости фильтрации метана, рис. 7.

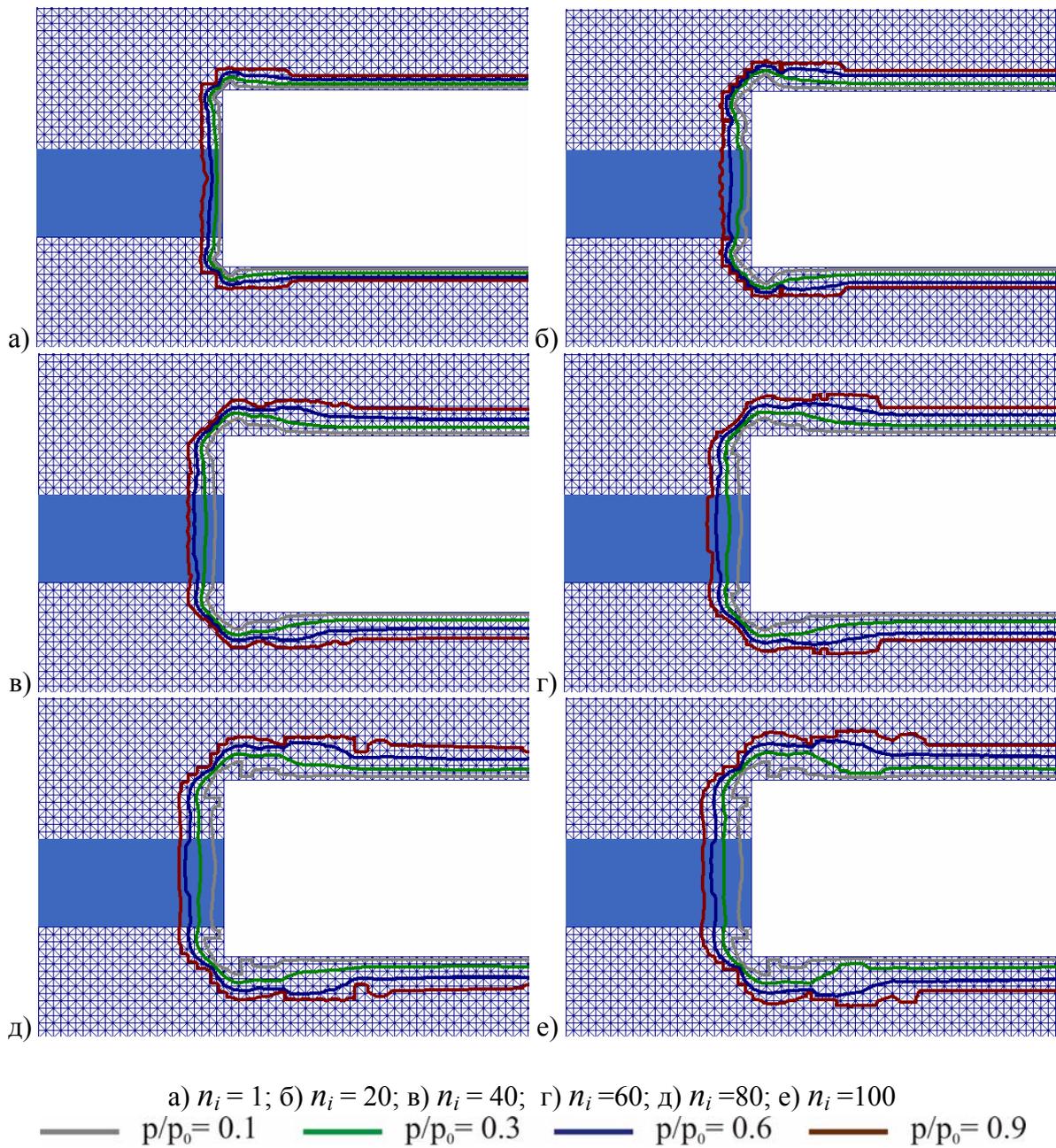


Рис. 5 – Распределение значений относительного давления  $p/p_0$  в различные моменты времени.

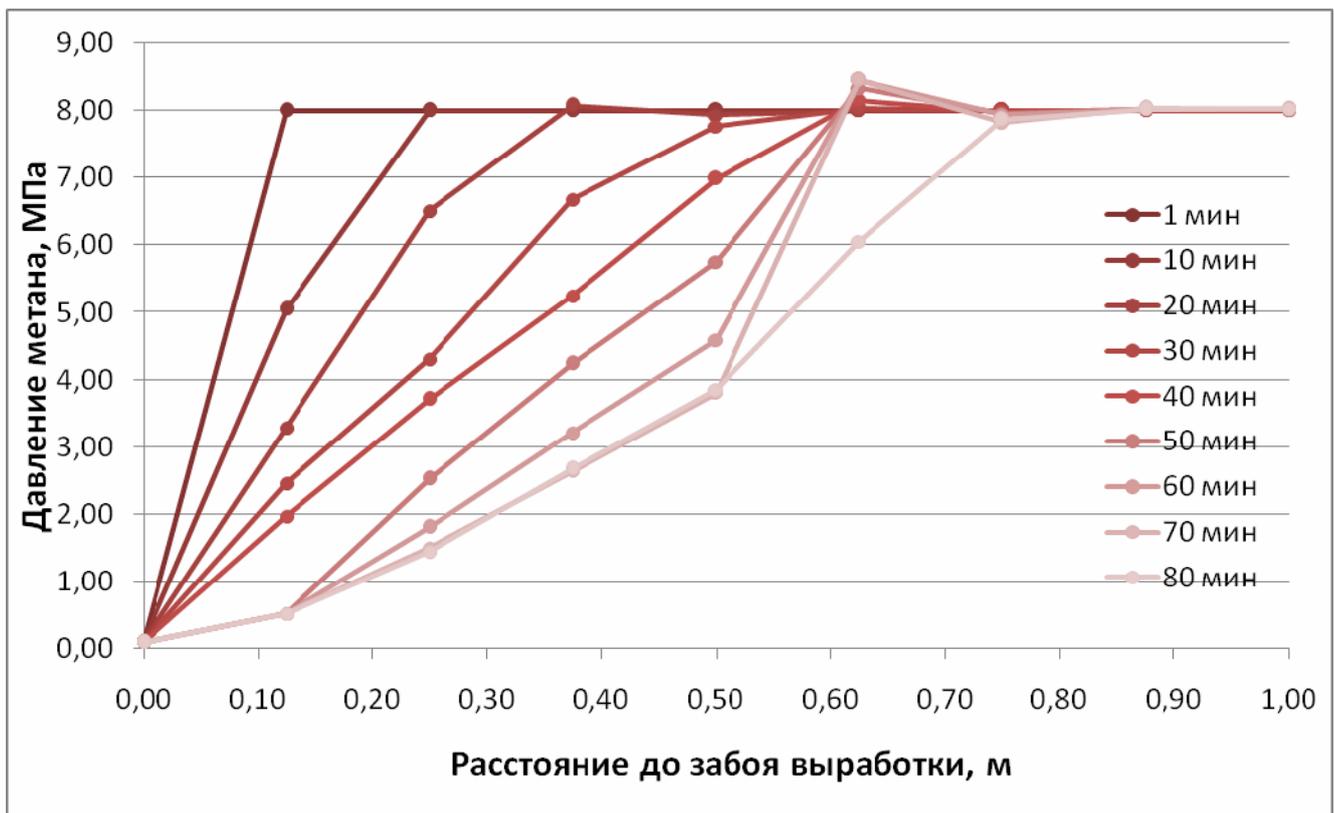


Рис. 6 – Значения давления метана в угольном пласте в зависимости от расстояния до забоя выработки в различные моменты времени.

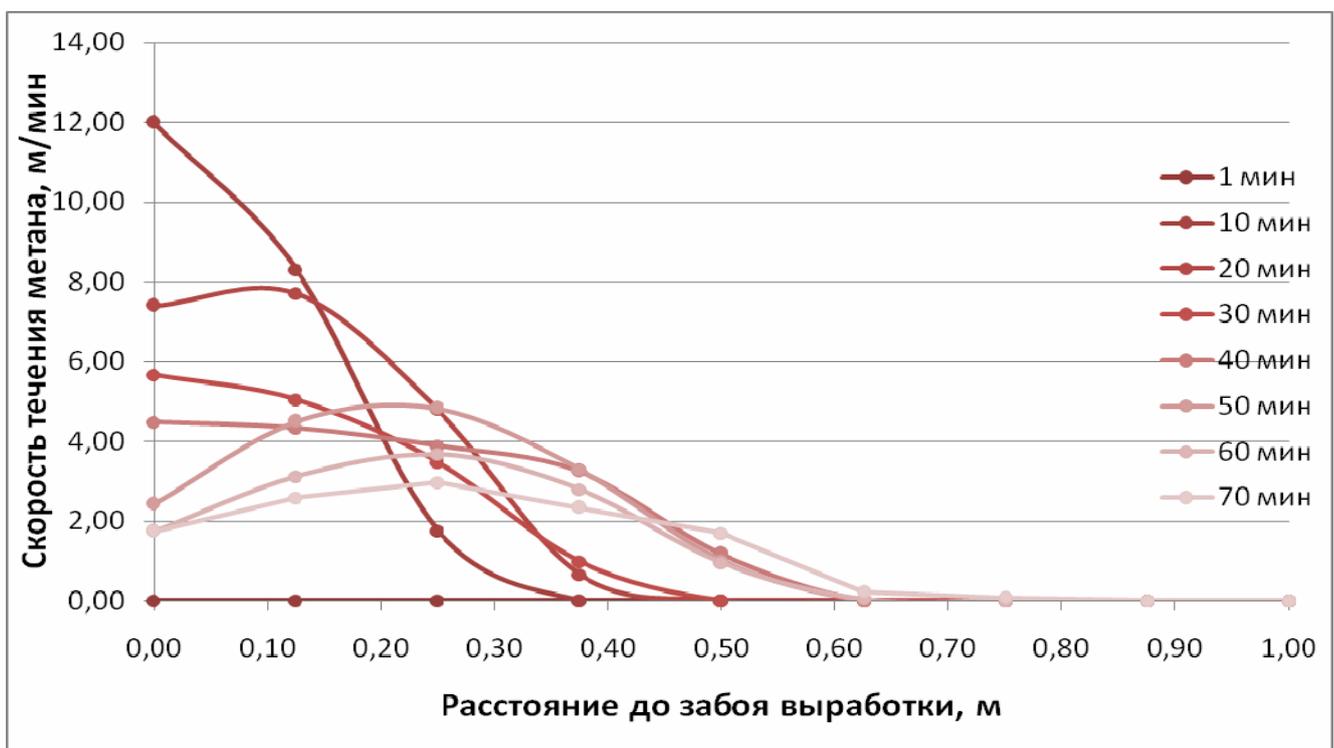


Рис. 7 – Скорости фильтрации метана в угольном пласте в зависимости от расстояния до забоя выработки в различные моменты времени.

Видно также, что на промежутке времени с 40-й по 70-ю итерацию на расстоянии 60-70 см от поверхности забоя происходит небольшое повышение дав-

ления метана. Такой скачок вызван тем, что эта зона попадает в область опорного давления, сжимающие напряжения смыкают трещины, препятствуя фильтрации метана, и поры, повышая в них его давление. Кроме этого можно сделать вывод, что в течение первых 70 временных итераций массив дегазируется на глубину до 60 см.

Что касается скоростей фильтрации, на рис. 7 видно, что в начальные моменты времени, первые 10 итераций, они принимают максимальные значения, причем максимум достигается на поверхности забоя (угольного пласта). В дальнейшем максимальные значения становятся более низкими, и их горизонтальная координата перемещается вглубь пласта. Можно заметить, что координата  $x$  начала фильтрационного движения также постоянно смещается вглубь пласта, к 70-й итерации после остановки забоя достигая значения 75 см.

Для более наглядного представления этих процессов в зависимости от времени построим следующие графики: максимальной  $V_{max}$  и средней  $V_{cp}$  скоростей фильтрации, рис. 8 и общего расхода метана  $Q$ , рис. 9.

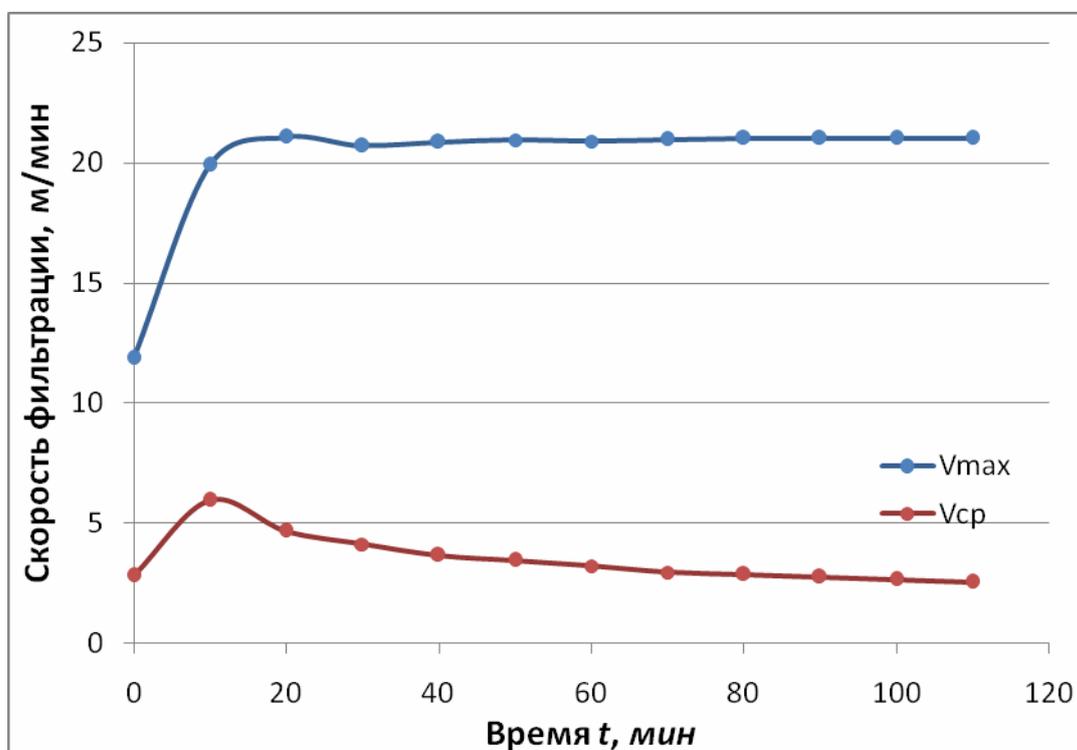


Рис. 8 – Изменение во времени максимальной скоростей фильтрации метана

Максимальные скорости фильтрации метана на протяжении первых 10 мин резко возрастают, а затем остаются примерно на постоянном уровне. А средние скорости, которые также растут в течение 10 мин, затем постепенно падают, что говорит о медленном затухании фильтрационного процесса.

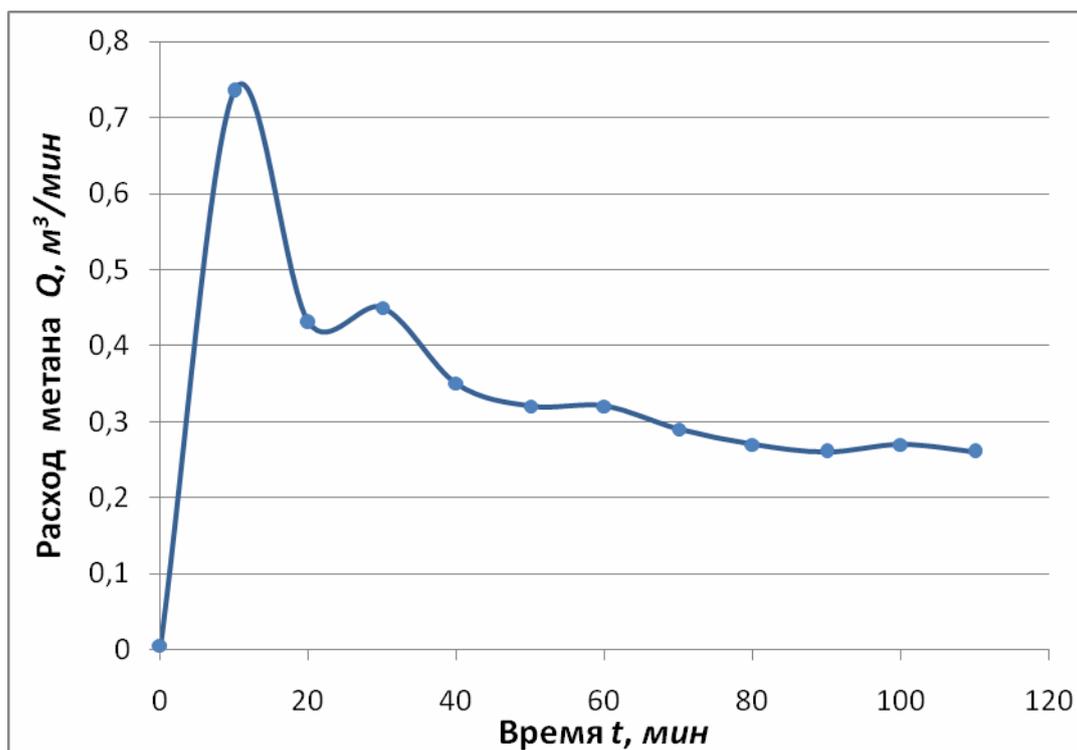


Рис. 9 – Изменение во времени общего расхода метана  $Q$

Общий расход метана характеризует газовыделение в очистной забой с единицы его длины, рис. 9. Видно, что этот показатель достигает максимума при  $t = 10$  мин, затем резко снижается, выходя на определенный относительно постоянный уровень.

Таким образом, при анализе данных компьютерного моделирования поведения газонасыщенного углепородного массива на основании решения связанных задач геомеханики и фильтрации газа получено, что остановка очистного забоя приводит к резкому перераспределению значений минимальных напряжений, которые характеризуют возможность возникновения хрупких деформаций (при  $\sigma_3/\gamma H \rightarrow 0$ ). Дальнейшее увеличение зоны  $\sigma_3/\gamma H \rightarrow 0$  носит более постепенный характер. Зоны повышенной разнокомпонентности продолжают развиваться в течение всего расчетного времени, что вызывает увеличение проницаемости пород и приводит к интенсификации фильтрационных процессов в окрестности выработки. Область фильтрации метана постепенно увеличивается во времени согласно изменяющемуся полю напряжений. Чем более продолжительное время будут остановлены добычные работы, тем более обширную область захватит развивающаяся система трещин, которая позволит метану из угольного пласта и газоносных вмещающих пород перемещаться в атмосферу выработки. Изобары пониженного давления со временем отступают вглубь массива, что говорит о постепенной дегазации вмещающих пород. Градиенты давления также уменьшаются. Более высокий градиент давления (в первые моменты времени) обуславливает и более высокие скорости фильтрации метана, которые в начальные моменты времени принимают максимальные значения, причем максимум достигается на поверхности забоя (угольного пласта). В ходе вычислительного эксперимента глубина угольного пласта, на которой происхо-

дят десорбційні процеси, збільшується. При цьому інтенсивність газовиділення спочатку зростає, а потім поступово падає.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Російська угольна енциклопедія. – М.-СПБ.: Видавництво ВСЕГЕИ, 2007. – 570 с.
2. Круковська, В.В. Вивчення параметрів процесу викиду вугілля та газу з використанням комп'ютерного моделювання // Деформування та руйнування матеріалів з дефектами та динамічні явища в гірських породах та видобутках: Матер. XVIII Міжн. наук. школи. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2008. – С. 132-134
3. Баклашов, І.В. Механіка підземних споруд та конструкцій кріпів / І.В. Баклашов, Б.А. Картозія – М., Недра, 1984.
4. Надаі А. Пластичність та руйнування твердих тіл. – М.: Мир, 1969. – Т. 1. –648 с.
5. Круковська, В.В. Розв'язання об'ємної задачі нестационарної фільтрації метану з вугільного пласта в видобутку методом кінцевих елементів. // Геотехнічна механіка // Сб. научн. тр./НАН України ИГТМ. – Дніпропетровськ, 2007. - № 69. – С. 240-248.

УДК 622.411.33

Доц. В.П. Денисенко,  
доц. Р.В. Верба,  
(ДонДТУ)

### **НЕЙРОМЕРЕЖНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕТАНОВОСТІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО НАБОРУ ВИХІДНИХ ДАНИХ**

Представлена методика адаптації нейросетевого прогнозування метанообильності видобутку вугільних шахт в умовах обмеженого набору вихідних даних. Розроблено та реалізовано алгоритм адаптації нейросетевого поточного прогнозу метанообильності.

### **NEURO-NETWORK PROGNOS OF THE METHAN MINING MAKING IN THE CONDITIONS OF THE LIMITED OUTPUT DATA BY NEYROMEREG**

Presented method of adaptation of neyromereg prognos of the methan making of coal mines in the conditions of the limited data set. It is developed and the algorithm of adaptation of neyromereg current prognos of methan is realized.

Високий рівень виділення метану у гірничі виробки у сучасних умовах ведення гірничих робіт – є одним із ключових факторів, що визначають складність робіт з виїмки вугілля і його високу собівартість. Важливою складовою частиною вирішення проблеми боротьби з метаном у вугільних шахтах є надійний і якісний прогноз метановості гірничих виробок виїмкових ділянок з високонавантаженими лавами. Відсутність методик і сучасних інструментальних засобів для адекватного поточного прогнозування процесу метановиділення на діючій виїмковій ділянці та прийняття оперативних заходів запобігання аварійних газових ситуацій визначає актуальність даної роботи.

Розробка алгоритму адаптації нейромережного поточного прогнозування метановості гірничих виробок в умовах обмеженого набору вихідних даних для підвищення якості поточного прогнозу метану даної роботи.

Основними джерелами виділення метану на видобувній ділянці є робочий пласт та вироблений простір. Метановиділення із цих джерел змінюється в часі, тому що на нього впливають фактори складної фізичної системи, що включає ці