

2. Кирия Р.В. Истечение сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием / Р.В. Кирия, Д.Д. Брагинец, Б.И. Мостовой // Сборник научных трудов / НГУ. – Днепропетровск. – 2009. – № 32. – С. 114–122.
3. Штернлихт Д.В. Гидравлика / Д.В. Штернлихт. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 639 с.
4. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов / Р.Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.
5. Кирия Р.В. О коэффициенте внутренних потерь при движении сыпучей среды по элементам перегрузочных узлов ленточных конвейеров / Р.В. Кирия // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. – Днепропетровск, 2003. – Вып. 41. – С. 159–167.

**УДК 622.26:622.235.001.57**

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ СВЯЗАННОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА, ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ ВЗРЫВА ШПУРОВЫХ ЗАРЯДОВ И ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА**

Виконано чисельне моделювання зв'язаних процесів підривання шпурових зарядів, зміни напружено-деформованого стану гірських порід та фільтрації газу у порушеному породному масиві у вибої гірничої виробки. Результати розрахунку порівняно з результатами розв'язання окремих складових задач вибухової дії, 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, IMPACT OF BLAST-HOLE CHARGE BLASTING AND METHANE FILTRATION INVESTIGATION**

Numerical modeling of coupled processes blast-hole charge blasting, of rock stress-strain state change and methane filtration in disrupted rock massif in the mine face working is completed. The calculation results are compared with the results of solving separate problems of blasting impact, 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.

Зачастую процессы, происходящие в массиве горных пород при подземной добыче угля (изменение НДС твердого тела, диффузия и фильтрация жидкости и газа, десорбция газа, теплофизические и химические процессы) связаны между собой и оказывают влияние один на другой. Степень этого влияния может быть различной. Например, при расчете параметров напряженного состояния можно пренебречь изменением температуры пород 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 про-

цессов, происходящих в массиве при ведении горных работ. В данной работе рассмотрено протекание связанных процессов изменения НДС массива в результате воздействия от взрыва шпуровых зарядов, изменения НДС массива под действием веса вышележащих пород и фильтрации газа при проведении горной выработки буровзрывным способом по газоносному пласту.

Рассмотрим задачу об определении нестационарного напряженно-деформированного состояния породного массива, распространения волны напряжений от взрыва заряда и параметров нестационарной фильтрации метана в сечении, параллельном плоскости забоя выработки, пересекающем скважину диаметром 400 мм и шпур диаметром 40 мм и проходящем через центр сосредоточенного заряда в шпуре. 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 ударной волны скачок давления на ее фронте и зона растяжения (разрежения) за фронтом накладывают определенные возмущения на поле напряжений и поле давления газа.

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 протекание связанных процессов

Процесс	Параметр	Физический смысл параметра	Ед. изм.
Изменение НДС массива (НДС), взрывное воздействие (Взрыв)	$\sigma_1/\gamma H$	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 газа (Ф)	$P$	давление метана	МПа
	$V$	скорость фильтрации метана	м/мин

Перераспределение поля напряжений в исследуемой области и фильтрация метана происходят в одно и то же время, взрывание шпурового заряда – на 40-й временной итерации.

Исследуем степень связи этих процессов. Для этого решим четыре задачи.

1) В полной постановке (Взрыв+НДС+Ф):

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + Y_i + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = 0; & T_i(t) = -c \frac{\partial u_i}{\partial t}; \\ \sigma_r = f(r, \rho_n, c_n); & \sigma_\varphi = f(r, \rho_n, c_n); \\ \mu_2 \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q = 0; & k = f(\sigma_{ij}); \end{cases}$$

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;  $P_i(t)$  – силы, обусловленные давлением газа;  $u_i$  – перемещения;  $\sigma_r, \sigma_\varphi$  – радиальная и тангенциальная составляющие волны напряжений при взрыве сосредоточенного заряда, рассчитываемые по формулам Боровикова В.А. и Ванягина И.Ф. [1] для крепких горных пород;  $p$  – давление газа;  $q$  – интенсивность источников газовой выделению;  $K$  – коэффициент проницаемости [2];  $\mu_2$  – вязкость газа.

2) Расчет параметров напряженного состояния и взрывного воздействия без учета сил давления газа (Взрыв+НДС):

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + Y_i + X_i(t) + T_i(t) = 0; & T_i(t) = -c \frac{\partial u_i}{\partial t}; \\ \sigma_r = f(r, \rho_n, c_n); & \sigma_\varphi = f(r, \rho_n, c_n); \end{cases}$$

3) Расчет параметров взрывного воздействия и фильтрации метана без учета НДС массива (Взрыв+Ф):

$$\begin{cases} \sigma_r = f(r, \rho_n, c_n); & \sigma_\varphi = f(r, \rho_n, c_n); \\ \mu_2 \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q = 0; & k = f(\sigma_{ij}); \end{cases}$$

4) Расчет параметров напряженного состояния и фильтрации метана без учета взрывного воздействия (НДС+Ф):

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

Начальные и граничные условия:

$$p|_{t=0} = p_0, \quad p_0 = 0,8 * \gamma_6 H;$$

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

где  $p_0$  – давление метана в момент времени  $t=0$ ;  $\gamma_6$  – 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;  $t_{\text{взр}}$  – момент взрыва;  $x_{\text{взр}}, y_{\text{взр}}$  – координаты центра взрыва;  $P_d$  – детонационное давление.

Затем полученные массивы данных сравним попарно в значащей области, включающей скважину диаметром 400 мм и шпур для взрывания заряда диаметром 40 мм, рис. 1:

- 1) для процессов Взрыв+НДС+Ф и Взрыв+НДС – параметры  $\sigma_1, Q, P$ ;
- 2) для процессов Взрыв+НДС+Ф и Взрыв+Ф – массивы параметров  $\sigma_1, Q, P, p$  и  $V$ ;
- 3) для процессов Взрыв+НДС+Ф и НДС+Ф – массивы  $\sigma_1, Q, P, p$  и  $V$ .

Общий процесс (Взрыв+НДС+Ф) будем обозначать  $\Pi$ , составляющие процессы при отдельном их рассмотрении Взрыв+НДС –  $\Pi_1$ , Взрыв+Ф –  $\Pi_2$ , НДС+Ф –  $\Pi_3$ , параметры этих процессов соответственно –  $n, n_1, n_2$  и  $n_3$ . В качестве критерия, характеризующего влияние процесса  $\Pi_1$  на общий результат  $\Pi$ , возьмем

$$\Delta \Pi \ll \Pi = \frac{\sum_{i=1}^N |n_i - n_1|}{N};$$

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

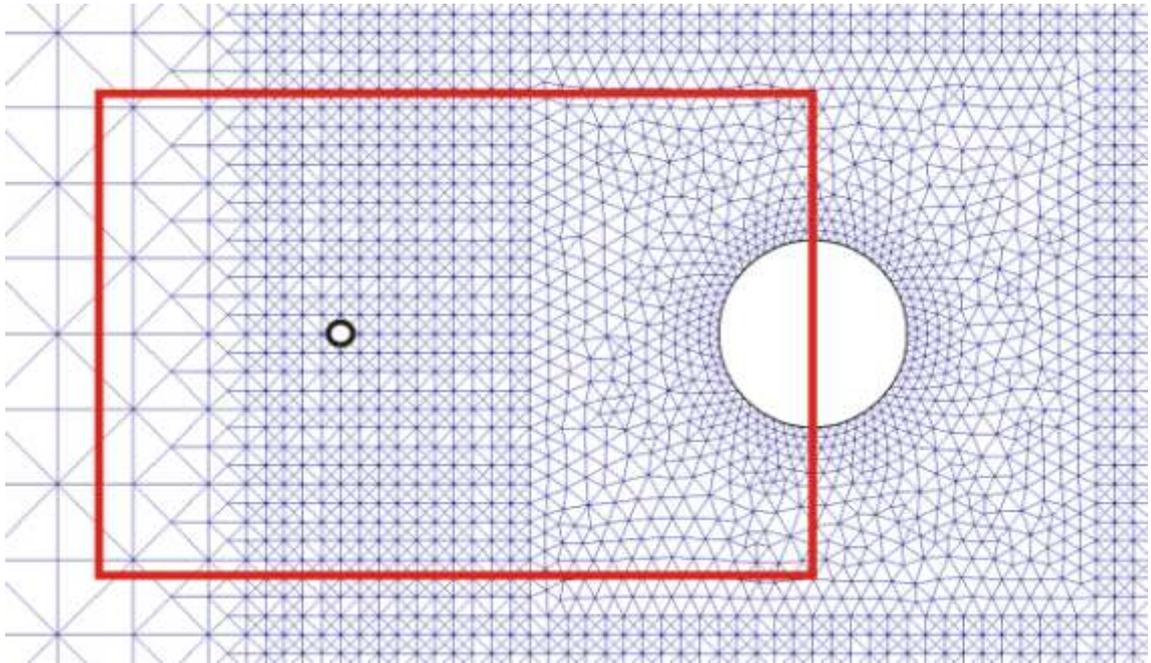


Рис. 1 – Область сравнения параметров

В результате расчетов получим данные сравнения на различных временных итерациях, рис. 2; 5 и 7.

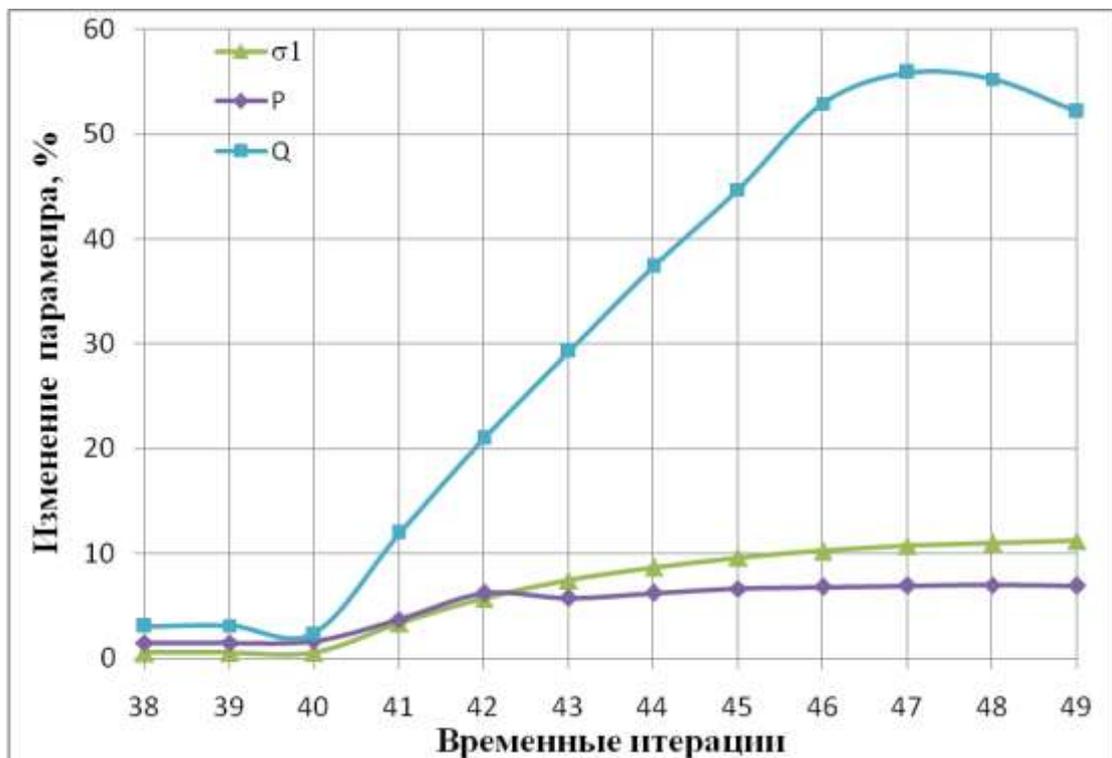
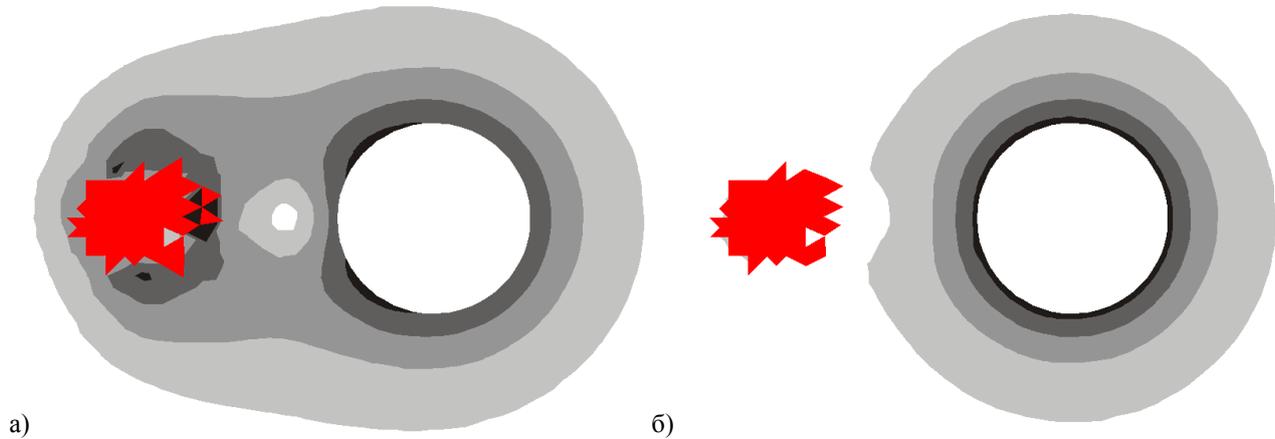


Рис. 2 – Изменение параметров  $\sigma_1$ ,  $Q$  и  $P$  для процессов Взрыв+НДС+Ф и Взрыв+НДС

Из рис. 2. видно, что влияние учета давления газа на изменение параметров  $\sigma_1$  и  $P$  не превышает 12 % за рассмотренный период времени. Однако отсутствие учета газового давления в этой задаче приводит к значительным, до 60% изменениям параметра  $Q$ , характеризующего степень разнокомпонентности по-

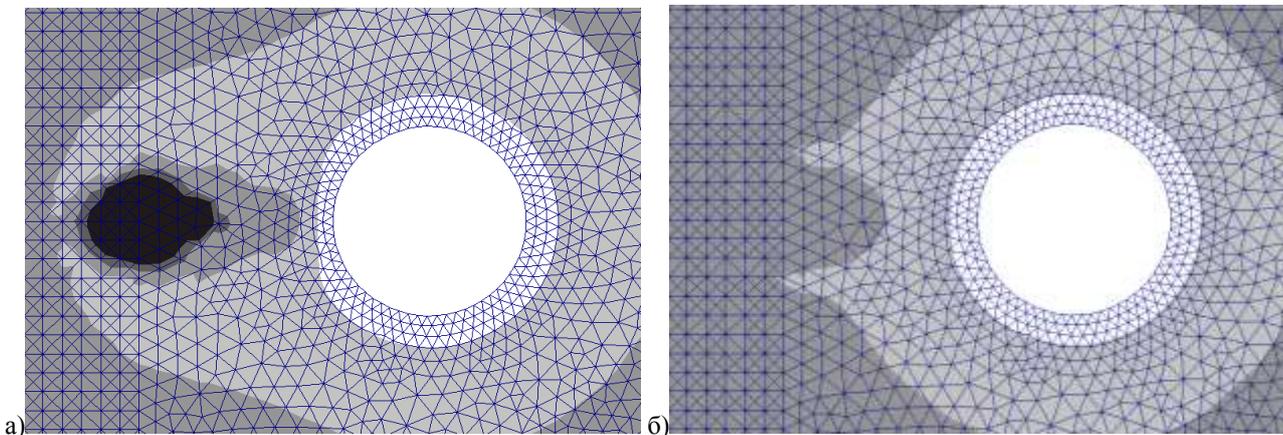
ля напряжений, поэтому  $\Delta I / \bar{I} \geq 20\%$ .

На рис. 3, 4 хорошо заметна разница между результатами расчета в этих двух случаях. Понятно, что учет давления содержащегося в трещинно-поровом пространстве метана и давления образующихся при взрыве газообразных продуктов химических реакций привносит весомую составляющую в общий результат.



а) процесс Взрыв+НДС+Ф; б) процесс Взрыв+НДС.

Рис. 3 – Распределение значений параметра  $Q$  и область неупругих деформаций, 47 итерация



а) процесс Взрыв+НДС+Ф; б) процесс Взрыв+НДС.

Рис. 4 – Распределение значений параметра  $P$ , 47-я итерация

Таким образом, отсутствие учета процесса фильтрации при моделировании взрывного воздействия в напряженных горных породах приводит к значительной погрешности расчета поля напряжений, достигающей в определенные моменты времени 60%.

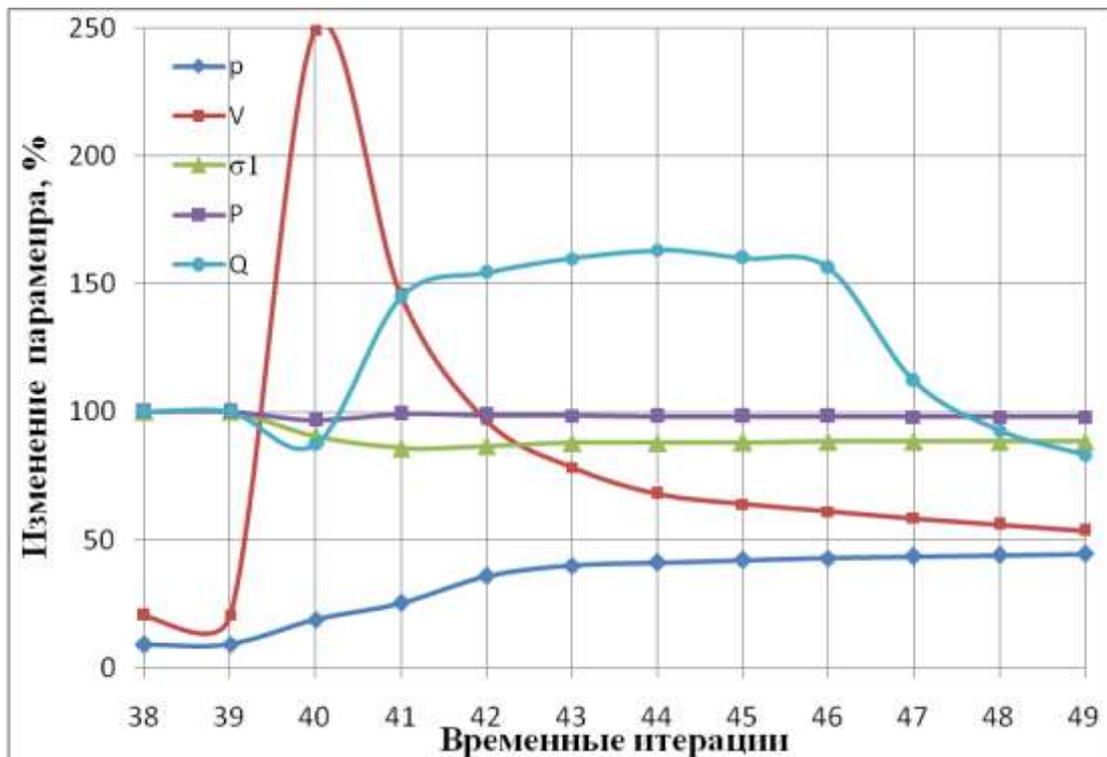
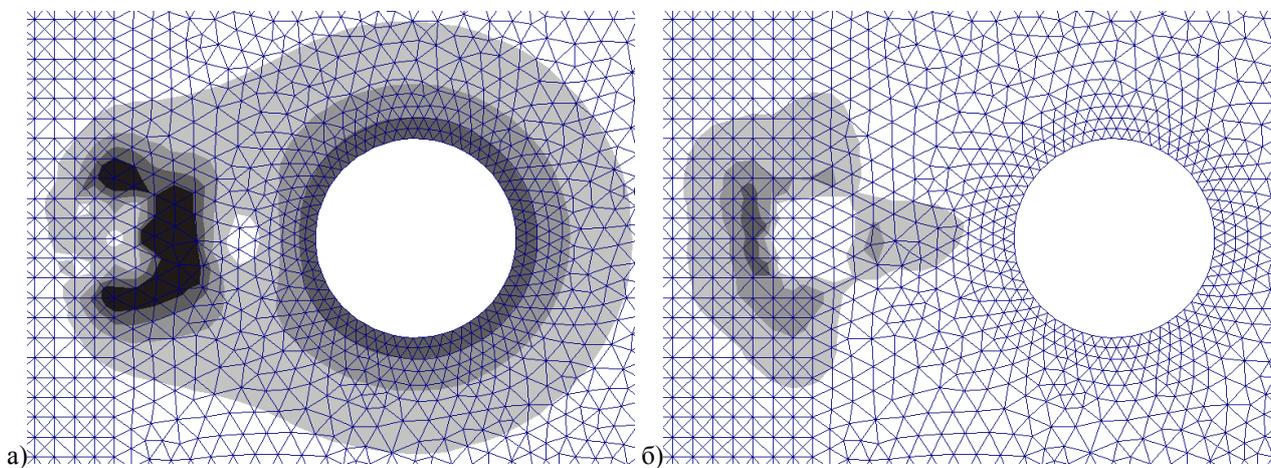


Рис. 5 – Графики изменения параметров для процессов Взрыв+НДС+Ф и Взрыв+Ф

Отсутствие учета напряженного состояния при расчете области фильтрации и параметров взрывной волны также значительно влияет на результат расчета, рис. 5. Сильнее всего изменение НДС массива влияет на погрешность расчета геомеханических параметров  $\sigma_1$ ,  $Q$ , рис. 6,  $P$  и скоростей фильтрации газа  $V$ , которая в течение рассмотренных итераций колеблется в пределах от 50 до 250% и

$$\Delta P \approx 20\%.$$



а) процесс Взрыв+НДС+Ф; б) процесс Взрыв+Ф.  
Рис. 6 – Распределение значений параметра  $Q$ , 42 итерация

Погрешность расчета давления газа в течение рассмотренного периода времени приближается к 50%, что также говорит о высокой степени зависимости

этого параметра от учета геомеханического фактора. Можно сделать вывод, что процесс изменения НДС массива под действием веса вышележащих пород в этой системе связанных процессов также играет важную роль при получении адекватной картины происходящего. Отсутствие учета геомеханики образования естественного поля напряжений при расчете параметров взрывного воздействия приводит к значительной погрешности расчета, доходящей до 150-250%.

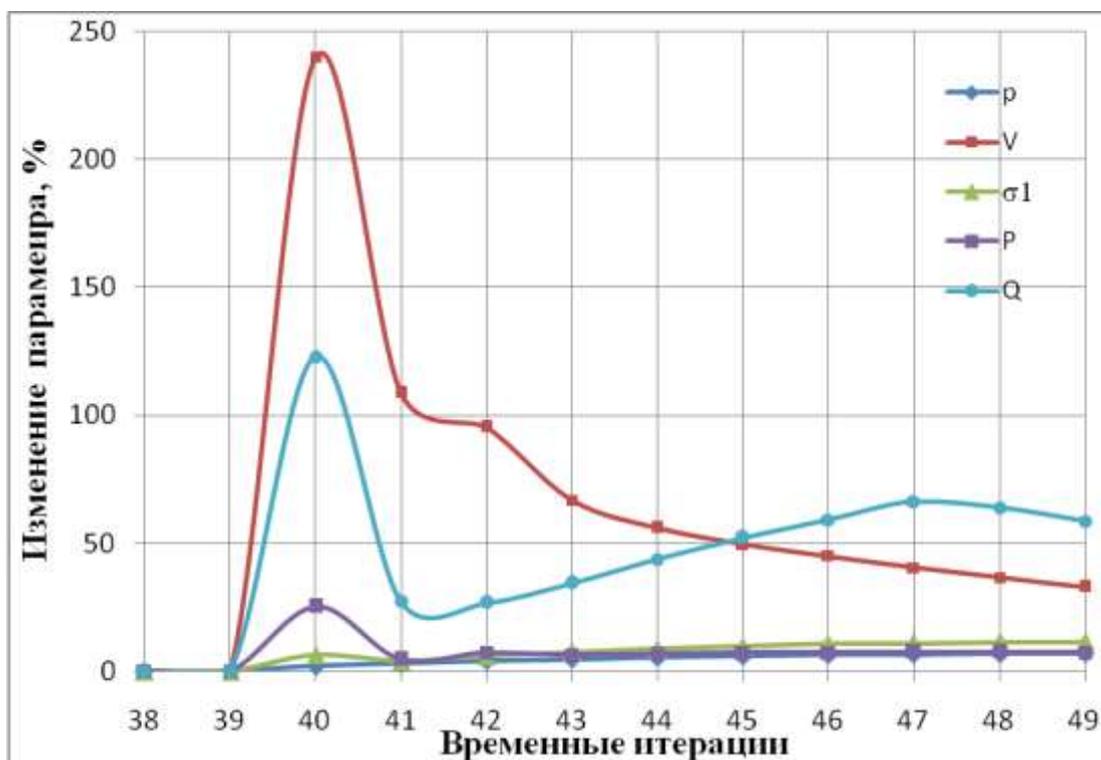
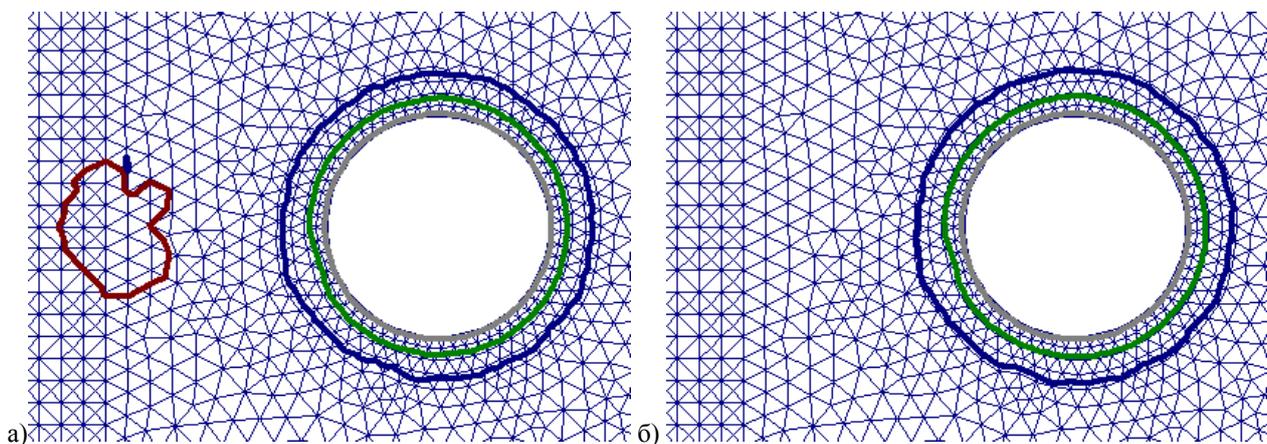


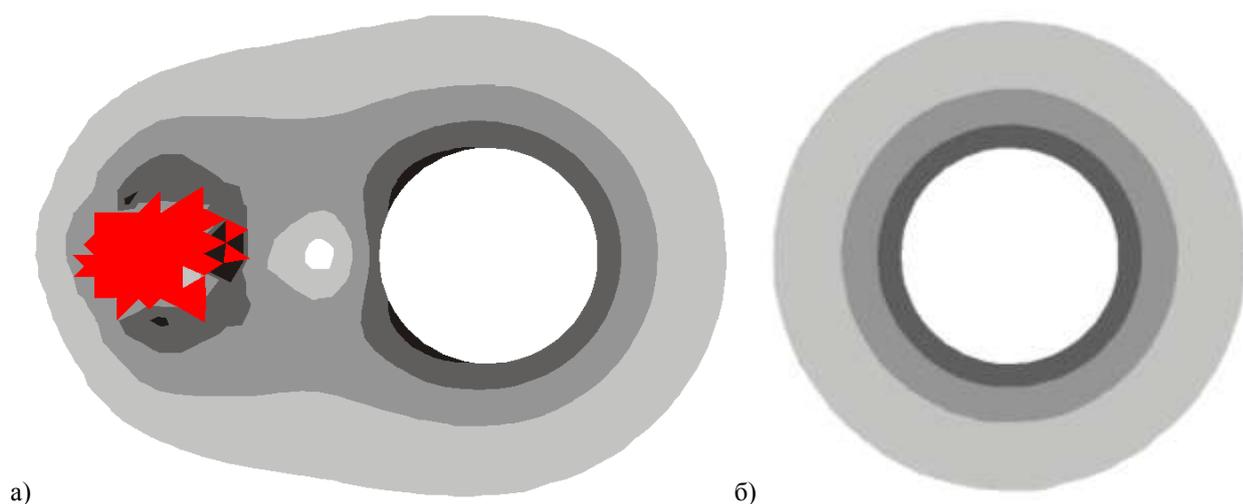
Рис. 7 – Графики изменения параметров для процессов Взрыв+НДС+Ф и НДС+Ф

Отсутствие напряжений от взрывной волны во втором случае дает погрешности исследуемых параметров до 250%, рис. 7, причем наиболее заметно изменение параметров скоростей фильтрации газа и разнокомпонентности поля напряжений. Как видно из рис. 8б, в момент взрыва отсутствует область высоких давлений газа в шпуре, в остальном распределения давления на рис. 8а и 8б идентичны.

Аналогично на рис. 9б отсутствуют зоны повышенной разнокомпонентности и неупругих деформаций в случае, когда не учитывается действие взрывной волны. Можно сказать, что  $\Delta\Pi \ll \Pi \geq 20\%$ .



а) процесс Взрыв+НДС+Φ; б) процесс НДС+Φ.  
Рис. 8 – Изобары относительного давления газа, 40 итерация



а) процесс Взрыв+НДС+Φ; б) процесс НДС+Φ.  
Рис. 9 – Распределение значений параметра  $Q$  и зона неупругих деформаций, 47 итерация

Как и следовало ожидать, процесс изменения НДС массива под действием взрыва шпурового заряда в этой системе связанных процессов также играет важную роль. Его отсутствие при расчете параметров взрывного воздействия приводит к погрешности расчета, достигающей до 250%.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что каждый из трех связанных процессов играет важную роль в формировании общего результата – процессы изменения НДС массива в результате воздействия от взрыва шпуровых зарядов, изменения НДС массива под действием веса вышележащих пород и фильтрации газа равноправны, при моделировании проведения выработки буровзрывным способом нельзя пренебрегать ни одним из них.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

## **МИКРОНАРУШЕННОСТЬ МИНЕРАЛОВ И ПОРОД – СЛЕДСТВИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ**

Встановлені петрографічними методами системи мікропорушеності структури кварцу в пісковиках Донбасу відтворюють умови і типи палеодеформацій, які впливають на пористість пісковиків, на виникнення тріщин у вугленосній товщі. Статистична оцінка типів мікродеформацій структури мінералів пісковиків і кореляція їх з порушеннями макрорівня показала зв'язок в межах 55 %.

## **MICRODISLOCATION OF MINERALS AND ROCKS AS REFLECTION OF GEODYNAMIC DEFORMATIONS**

The systems of microstrains structure of quartz in sandstones of Donbass set by petrographic methods reproduce terms and types of paleodeformation which influence on porosity of sandstones, on the origin of cracks in an coalbearing layer. Statistical estimation of types of microstrains of structure of minerals of sandstones and correlation of them with violations of macrolevel showed communication within the limits of 55 %.

Работа посвящена изучению структурных преобразований терригенных образований Донецкого бассейна на примере песчаников 3-х фаций: русловых, подводных выносов рек и прибрежно-морских в юго-западных, центральных и северо-восточных геолого-промышленных районах. Выполнены детальные петрографические исследования минералов песчаников с определением типов микродеформаций их структуры, появление которых обусловлено тектоническими процессами.

Структурообразование полизернистого агрегата – песчаников – определяется динамическим равновесием таких факторов как внешнее воздействие и ответная реакция породы, которая контролируется анизотропией упругих свойств составляющих минералов. Среди трех типов деформаций: упругих, пластических и хрупких – изменение формы и внутренней структуры минералов обуславливают два последних. Пластические деформации возникают вследствие воздействия напряжения на структуру кристаллов породообразующих минералов и создают предпосылки для их разрушения. Каждый минерала по-своему, сообразно с классом симметрии (сингонией), реагирует на такие условия как сдвиг, сжатие, растяжение или их комбинацию. Среди многих породообразующих минералов только кварц обладает способностью трансформироваться по 11-и направлениям [1], у других – таких возможностей гораздо меньше. Пластические деформации между соседними зернами кварца наблюдались лишь в случае различной ориентировки их оптических осей. Кроме того, деформировались также полевые шпаты, слюды, обломки пород, но только нарушения структуры кварца характеризуются множеством комбинаций. Наряду с морфологическим разнообразием, обнаружилась определенная закономерность их распространения по площади и в разрезе угленосного бассейна.

Основным рабочим методом исследования пластических микродеформаций минералов был микроскопический. Анализировались наработки отечественных