

В качестве эталона принят конвейер с наиболее сложным режимом торможения – самый мощный конвейер в линии с наклоном вниз. В блоке «эталонная модель» заложены математические модели для определения тормозного усилия и времени торможения каждого конвейера линии. По сигналу аварийного торможения в блок эталонной модели поступает сенсорная информация о внешних возмущающих воздействиях: нагрузке и скорости движения каждого конвейера. Для эталонного конвейера рассчитывается тормозное усилие и соответствующее ему время торможения $T_{тэ}$, для всех остальных конвейеров время торможения принимаются равным эталонному $T_{ti} = T_{тэ}$ и рассчитываются тормозные усилия $F_{эi}$, обеспечивающие останов каждого конвейера за время $T_{тэ}$. По полученным с датчиков обратной связи значениям тормозных усилий F_i определяется разность $\Delta F_i = F_i - F_{эi}$, соответствующая отклонению объекта от его эталонной модели. Эта разность подается в адаптер для изменения управления привода, устраняющего ΔF .

Предложенные выше алгоритмы адаптивного управления пуском и торможением ленточных конвейеров в составе конвейерной линии могут быть использованы при разработке автоматической системы адаптивного управления конвейерными линиями, реализация которой возможна благодаря современному уровню развития компьютерной и сенсорной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков. Н.С. Тормозные режимы работы ленточных конвейеров / Н.С. Поляков, Е.М. Высочин, В.К. Смирнов // Вопросы рудничного транспорта. - М.: Недра, 1967. - Вып. 10. - С. 3-18.
2. Жигула. Т.И. Алгоритм компьютерной реализации оптимального автоматического управления режимами работы ленточного конвейера / Т.И. Жигула, Л.П. Ладутина, В.Ю. Максютенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. - Днепропетровск, 2007 – № 70. - С. 114-121.

УДК 622.235

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОХОДКЕ ВЫРАБОТКИ С АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ БУРОВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ

Виконано аналіз зв'язаних процесів, що відбуваються у пористому шаруватому вуглепородному масиві при проведенні виробки з анкерним кріпленням у викидонебезпечних умовах буровибуховим способом. Наведено розподіл параметрів напруженого стану газонасиченого гірського масиву навколо вибою гірничої виробки до, у момент та після підривання шпурових зарядів.

MODELLING OF THE COUPLED PROCESSES AT ROADHEADING WITH BOLTING BY BLAST-HOLE DRILLING

The analysis of coupled processes in porous layered coal- rock massif at road heading with roof bolting by blast-hole drilling is executed. Parameterization of stress state of the gas-saturated rock massif around mine working before, during and after blasting of blast-hole charges is shown in this article.

Массив горных пород представляет собой пористую слоистую многокомпонентную среду. При проведении горных выработок, выемке полезного ископаемого, дегазационных и водоотводящих мероприятиях эта среда выводится из состояния равновесия, в ней начинают развиваться многочисленные процессы, основными из которых являются изменение напряженно-деформированного состояния твердого тела, диффузия и фильтрация жидкости и газа, сорбция (десорбция) газа, теплофизические и химические процессы. Причем очень редко каждый из перечисленных процессов происходит отдельно, вне взаимосвязи с одним или несколькими другими. Исследование одиночного процесса, решение единственной системы уравнений, описывающей этот процесс, приводит к потере факторов и параметров, учет которых влияет на результат расчета. Поэтому проблема моделирования связанных процессов, происходящих в нарушенном горном массиве, является достаточно сложной и очень актуальной.

Связанные физические процессы описываются связанными системами дифференциальных уравнений. О. Зенкевич и Р. Тейлор [1] дали такую формулировку: «Связанные системы применимы ко множественным областям и зависимым переменным, которые обычно (но не всегда), описывают различные материальные явления и в которых

а) никакая система не может быть решена отдельно от другой;

б) никакой набор зависимых переменных не может быть явно устранен на уровне дифференциального уравнения».

В задаче об определении поля напряжений вокруг забоя выработки с анкерной крепью, проводимой по метаносодержащему угольному пласту, при взрывании шпуровых зарядов можно выделить три связанных процесса, происходящих в одной области горного массива – забое выработки. Это процессы изменения напряженно-деформированного состояния породного массива под действием силы тяжести, распространения волны напряжений от взрыва зарядов и нестационарная фильтрация газа. 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.

Сложность решения связанных задач, зачастую в нестационарной или трехмерной постановке, обуславливает необходимость применения численных методов решения. Одним из наиболее распространенных и удобных является метод конечных элементов (МКЭ), при использовании которого среда аппроксимируется дискретной моделью. При усилении дискретизации поведение дискретной системы приближается к поведению «непрерывной системы» – сплошной среды. Исследуемая область разбивается на N треугольных конечных элементов с узлами x_j^i, y_j^i , где i изменяется в пределах от 1 до 3, j – от 1 до N . Рас-

смотрим системы уравнений, которыми описываются перечисленные выше процессы.

Изменение во времени напряженно-деформированного состояния породного массива без учета сил инерции:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = \rho_n \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right), \quad (1)$$

где $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y ; t – время; $X_i(t)$ – внешние силы; $T_i(t) = -c_g \partial u_i / \partial t$ – силы, вызванные внутренним трением; $P_i(t)$ – силы, обусловленные давлением газа; ρ_n – плотность породы; u_i – перемещения.

В момент взрывания заряда во врубовом шпуре в массиве начинает распространяться волна сжатия, накладывая на существующее поле напряжений дополнительные напряжения $Y(t)$, вызванные взрывом. Поэтому уравнение (1) запишется в виде:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + Y_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = \rho_n \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right). \quad (2)$$

Для расчета радиальной и тангенциальной составляющих волны напряжений при взрыве сосредоточенного заряда, в диапазоне расстояний $r = (20 \div 100)R_0$, где R_0 – радиус заряда, будем использовать зависимости, полученные для крепких горных пород на основании лабораторных и натуральных экспериментальных данных Боровиковым В.А. и Ванягиным И.Ф. [2]. Когда волна сжатия подходит к открытой поверхности, она отражается от нее, превращаясь в волну растяжения, центром которой является точка, симметричная центру взрыва относительно поверхности забоя.

В матричной форме дифференциальное уравнение (2) может быть записано в следующем виде:

$$[C_g] \frac{\partial}{\partial t} \{U\} + [K_g] \{U\} + \{F_g\} = 0,$$

где $[K_g]$ – матрица жесткости; $\{U\}$ – вектор перемещений; $[C_g]$ – матрица демпфирования; $\{F_g\}$ – вектор усилий в узлах.

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

Уравнение неразрывности газового потока [3, 4] в плоской постановке при наличии источника газовой выделении можно представить в виде:

$$\mu_2 \frac{\partial p}{\partial t} + K \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q(t) = 0; \quad (3)$$

где p – давление газа; K – коэффициент проницаемости; μ_2 – вязкость газа; q – интенсивность источников газовой выделении.

Полное поле коэффициентов проницаемости пород K вычисляется как

$$k = k_{техн} + k_{тект}; \quad k_{техн} = f(x, y),$$

где $k_{техн}$ – технологическая проницаемость, вызванная перераспределением поля напряжений в результате проведения горной выработки; $k_{тект}(x, y)$ – начальная, тектоническая проницаемость.

Для моделирования действия взрыва в нашей задаче необходимо задать давление газов p_0 в точке взрыва в момент взрывания. Давление на стенки шпура равно [5]:

$$p_0 = p_d / 2,$$

где p_d – детонационное давление, определяющее величину импульса и бризантное действие ВВ.

Значения давления детонации были измерены авторами [5] для нескольких типов промышленных ВВ. Исходя из полученных данных, можно сказать, что $p_d = 1500 \div 24000$ МПа.

Путем минимизации функционала уравнение (3) может быть преобразовано к системе дифференциальных уравнений:

$$[C_f] \frac{\partial \{P\}}{\partial t} + [K_f] \{P\} + \{F_f\} = 0,$$

где $[K_f]$ – матрица фильтрационной проницаемости элемента; $\{P\}$ – вектор давления газа; $[C_f]$ – матрица демпфирования; $\{F_f\}$ – вектор поглощения (выделения) газа.

Таким образом, связанные процессы изменения напряженного состояния горного массива, действия взрыва и фильтрации газа описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} [C_g] \frac{\partial \{U\}}{\partial t} + [K_g] \{U\} + \{F_g\} = 0; \\ [C_f] \frac{\partial \{P\}}{\partial t} + [K_f] \{P\} + \{F_f\} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Начальные и граничные условия для данной задачи:

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma H; & p|_{t=0} &= 0,8 \cdot \gamma_{\text{воды}} H; \\ \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma H; & p|_{\Omega_3(t)} &= 0,8 \cdot \gamma_{\text{воды}} H; \\ \sigma_{zz}|_{t=0} &= \lambda \gamma H; & p|_{\Omega_4} &= p_v; \quad p_v = 0,1 \text{ МПа}; \\ u_x|_{\Omega_1} &= 0; & & \\ u_y|_{\Omega_2} &= 0; & p|_{t=t_{\text{взр}}, x=x_{\text{взр}}, y=y_{\text{взр}}} &= \frac{P_d}{2}; \end{aligned} \quad (5)$$

где γ – усредненная плотность вышележащих горных пород; H – глубина разработки; λ – коэффициент бокового распора; $\Omega_1(t)$ – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура; $\gamma_{\text{воды}}$ – плотность воды; $\Omega_3(t)$ – изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_4 – внутренний контур (выработка); p_v – давление воздуха в выработке; $t_{\text{взр}}$ – момент взрыва; $x_{\text{взр}}$, $y_{\text{взр}}$ – координаты центра взрыва; P_d – детонационное давление.

Чтобы получить решение связанных уравнений (4) с начальными и граничными условиями (5) на определенном временном промежутке, применяется конечно-разностный метод. При этом считается, что в начальный момент времени $t = 0$ распределение напряжений и давлений задано, и для достаточно малых значений Δt с помощью итерационных соотношений получаем распределение искомых величин на момент времени $t + \Delta t$. Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого текущего момента времени.

Блок-схема решения поставленной задачи показана на рис. 1. Процесс изменения НДС массива горных пород обозначен как **процесс П₁**, фильтрации газа – **процесс П₂**.

Рассмотрим результаты решения связанных уравнений (4) для случая, когда выработка высотой 2,6 м проводится по выбросоопасному угольному пласту сложного строения мощностью 1,9 м буровзрывным способом, в режиме сотрясательного взрывания. Схема расположения шпуров представлена на рис. 2. Тип применяемого взрывчатого вещества – П-5; Ф-5; 10П; 13П, величина заряда каждого шпура – 0,6 кг, взрывание производится за 1 прием. Подвигание забоя – 1,8 м. Свойства пород, используемые при расчетах, приведены в табл. 1. Применяется анкерное крепление

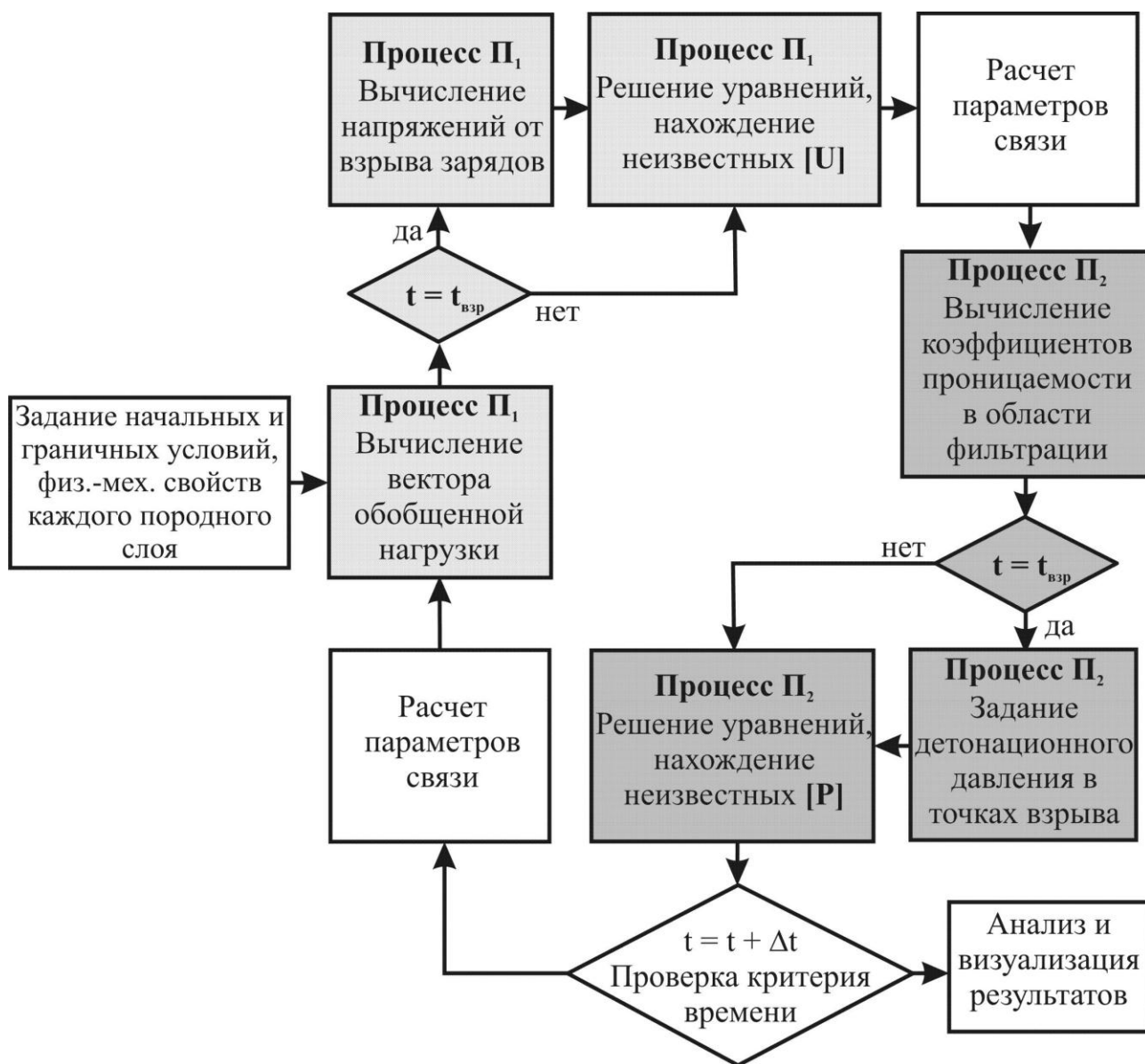


Рис. 1 – Блок-схема решения связанных уравнений (4)

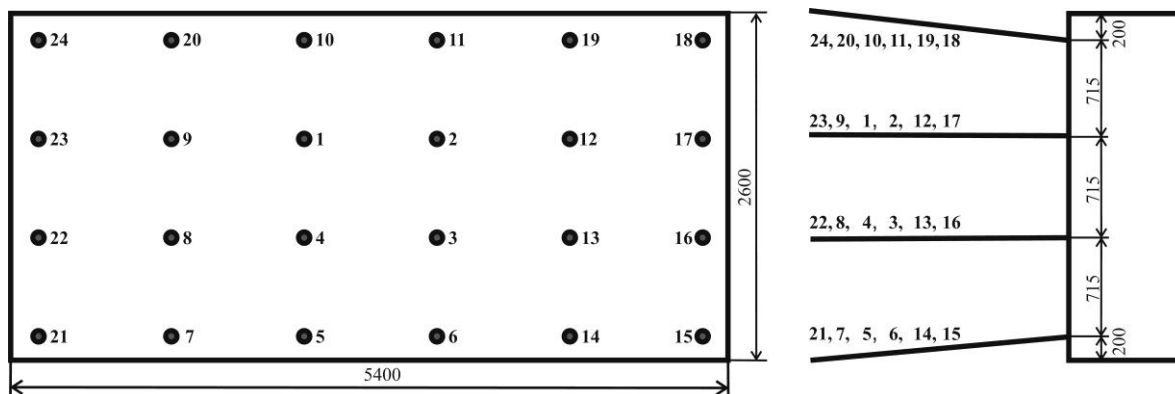
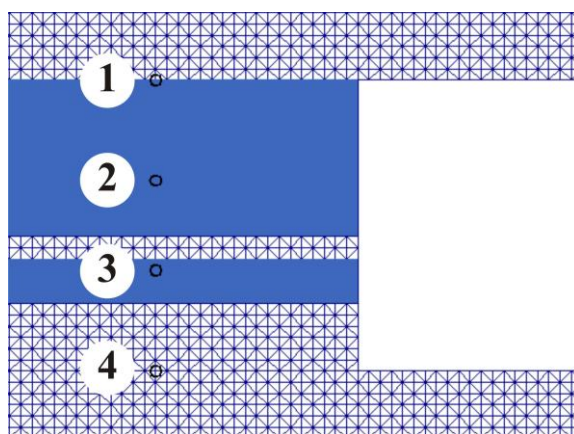


Рис. 2 – Схема расположения шпуров

Таблица 1 – Характеристики породы

Порода	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Прочность на сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа	Прочность на растяж., σ_p , МПа	Плотность, кг/м ³	Скорость звука в породе, м/с	Газоносность, м ³ /т
Алевролит	2500	0,35	55	7	2000	$5 \cdot 10^3$	–
Уголь	500	0,3	15	1	1250	$3 \cdot 10^3$	22,5

Рассмотрим продольное сечение, конечно-элементная сетка для которого показана на рис. 3.



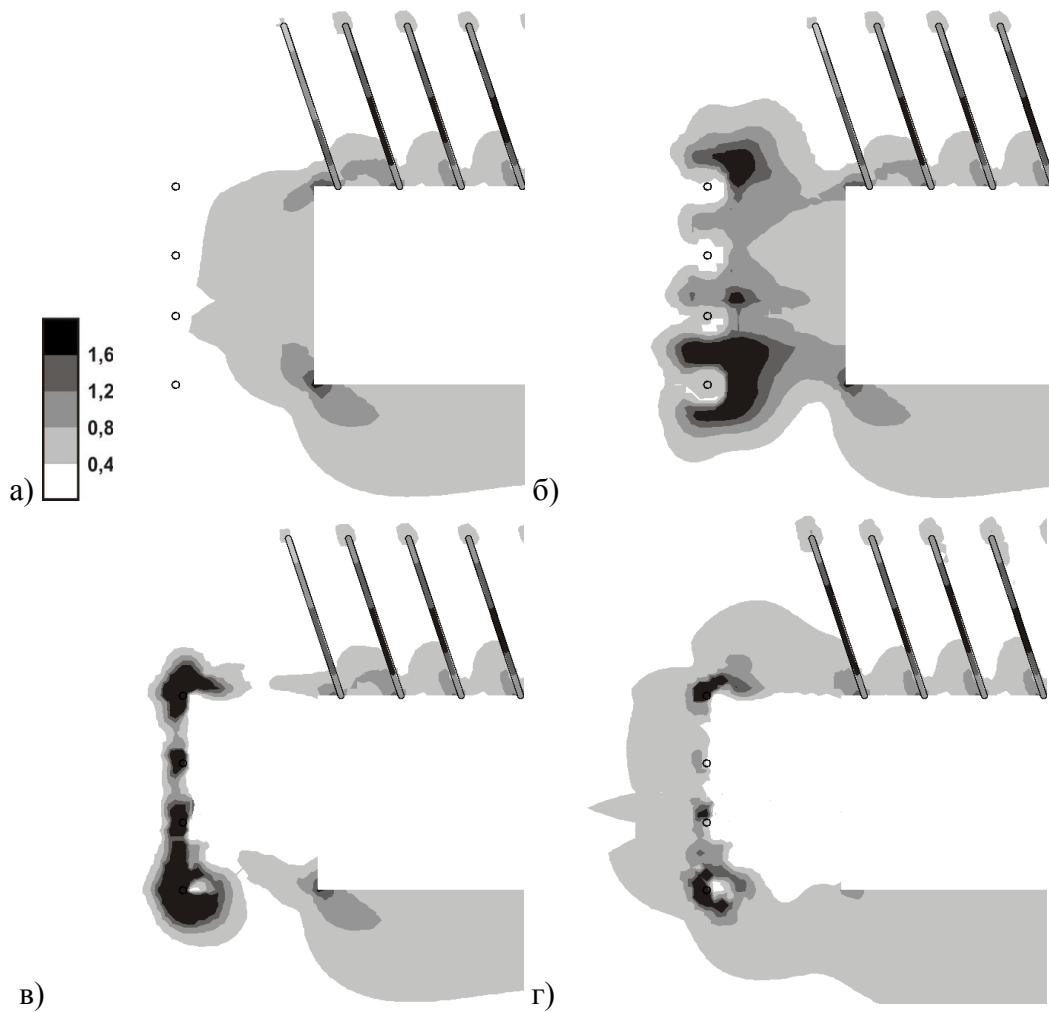
1-4 – номера зарядов ВВ

Рис. 3 – Центральный фрагмент конечно-элементной сетки с забоем выработки

Взрывание шпуровых зарядов происходит на 40-й временной итерации. При выполнении расчета с учетом отражения взрывной волны от поверхности забоя выработки получим распределение значений компонент тензора главных напряжений и параметры зоны неупругих деформаций. На рис. 4 показано распределение значений параметра $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$, на рис. 5 – зоны неупругих деформаций для выработки с АК при отставании АК от забоя $\Delta l = 0,3$ м.

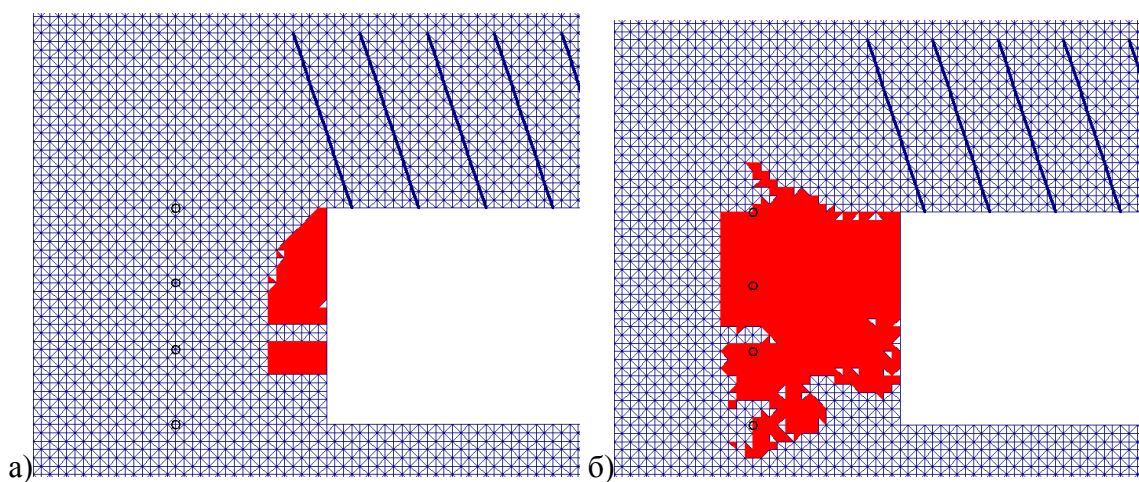
Из рисунков видно, что в результате действия взрыва изменяется распределение напряжений в забое и кровле выработки. Вокруг зарядов образуется зона полностью разрушенных пород, распространяющаяся вплоть до поверхности забоя выработки (область неупругих деформаций, рис. 5б). Выше первого и вокруг четвертого заряда расположены зоны сильно нарушенных пород (темно-серый цвет, $0,8 < Q < 1,2$), далее – зона повышенной трещиноватости (светло-серый цвет, $0,4 < Q < 0,8$), рис. 4б.

На следующей временной итерации, рис. 4в, видна образованная в результате взрывания зарядов полость – подвигание забоя составляет примерно 1,8 м. Концентрация напряжений в массиве вокруг вновь сформированного забоя в этот момент очень велика, параметр $Q > 1,6$. В кровле же, наоборот, породы еще не разгружены от горного давления и здесь $Q < 0,4$.



а) момент времени перед взрыванием зарядов; б) в момент взрыва;
 в) на следующей итерации после взрывания; г) через 30 итераций

Рис. 4 – Распределение значений параметра Q при $\Delta l = 0,3$ м

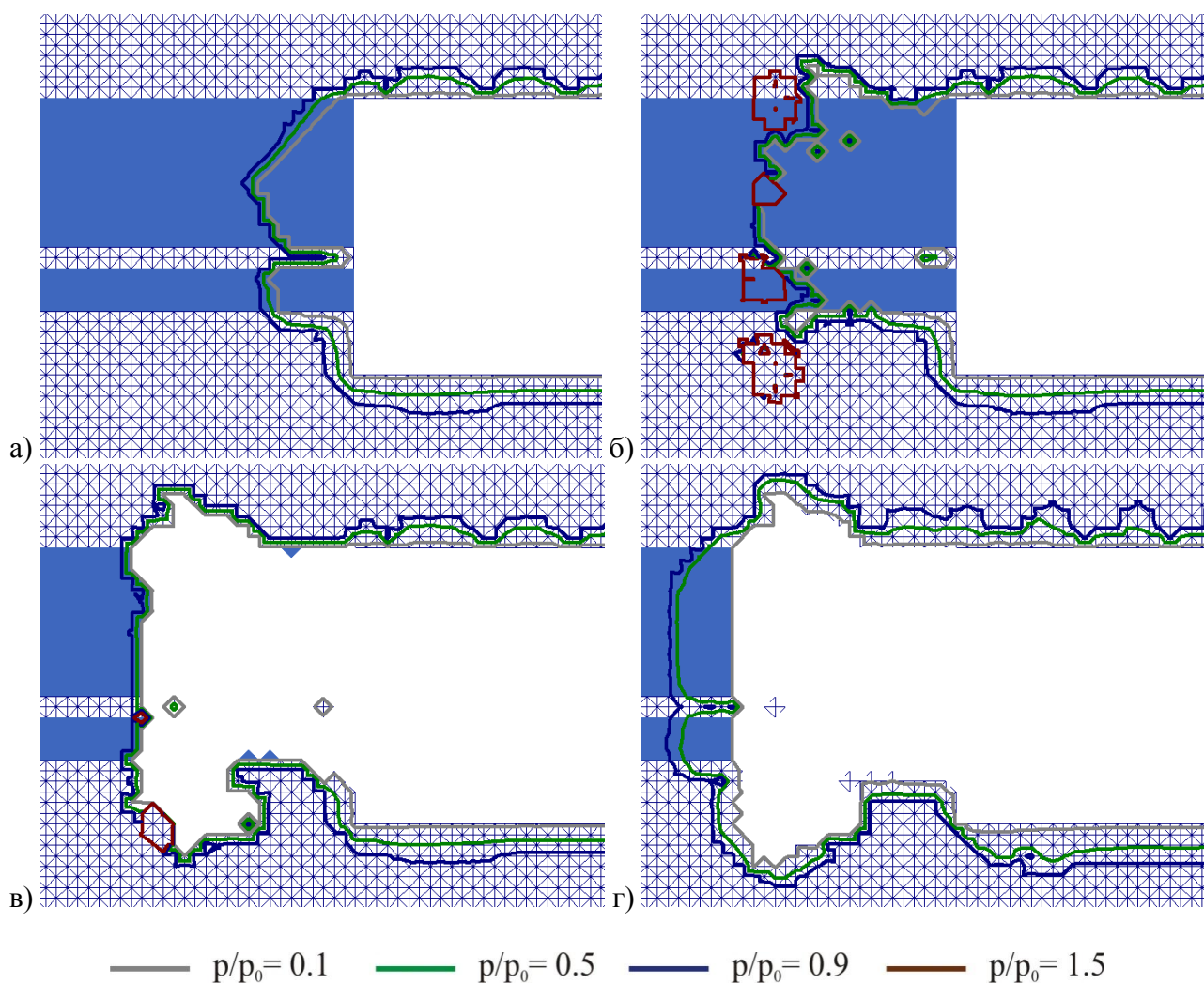


а) момент времени перед взрыванием зарядов; б) в момент взрыва

Рис. 5 – Зоны неупругих деформаций:

По прошествии определенного количества времени, иногда до нескольких часов, происходит постепенное перераспределение поля напряжений: область с $Q > 1,6$ уменьшается, а зона повышенной трещиноватости, в которой $0,8 < Q < 1,2$, распространяется далеко в глубь массива, рис. 4г. Кроме этого видно, что параметр Q достигает максимальных значений в области четвертого заряда, в аргиллите, как более прочной по сравнению с углем среде.

На рис. 6 показано изменение относительного давления газа в массиве на временной итерации, предшествующей взрыванию шпуровых зарядов, во время взрывания и после него.



а) момент времени перед взрыванием зарядов; б) в момент взрыва;
в) на следующей итерации после взрывания; г) через 30 итераций

Рис. 6 – Изобары относительного давления метана

Из рисунков видно, что в течение времени до взрыва происходит фильтрация метана, содержащегося в угольном пласте, в атмосферу выработки. Призабойная зона постепенно дегазируется, давление метана в ней понижается, изобары относительного давления отодвигаются от поверхности забоя в глубь массива, рис. 6а. В момент взрыва давление газа в точках расположения зарядов ВВ намного превосходит пластовое давление метана, рис. 6б, область фильтрации расширяется до размеров разрушенного взрывом углепородного массива. После взрывания, рис. 6в, г, образуется полость, глубина которой соответствует величине подвигания забоя – 1,8 м, процесс фильтрации продолжается, изобары относительного давления метана со временем снова отодвигаются от вновь образованной поверхности забоя в глубь массива, рис. 6г.

В результате проведения настоящей работы выполнен анализ связанных процессов, происходящих в пористом слоистом углепородном массиве при проходке подготовительной выработки с анкерной крепью буровзрывным способом, предложен способ решения системы связанных дифференциальных уравнений. Как видно из приведенного примера расчета параметров связанных процессов изменения НДС углепородного массива, фильтрации газа в нарушенной области и взрывания шпуровых зарядов, связь между процессами имеет большое значение для описания физических явлений, происходящих при проходке выработки. Если не учитывать всю многогранность связи параметров процессов, это, конечно, упростит задачу, но приведет к неправильному результату.

Разработанный метод моделирования связанных процессов изменения НДС углепородного массива, фильтрации газа в нарушенной области и взрывания шпуровых зарядов дает возможность:

- обосновать параметры проведения буровзрывных работ;
- обосновать применение простой или усиленной анкерной крепи в конкретных горно-геологических условиях;
- исследовать влияние параметра «отставание установки ряда анкеров от забоя выработки» на напряженное состояние пород кровли;
- исследовать влияние способа проведения выработки (комбайновый, буровзрывной) на ее устойчивость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zienkiewicz, O.C. The finite element method / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – Butterworth-Heinemann, 2000. – Т. 1. – 690 р.
2. Боровиков, В.А. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. / В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин. – М.: Недра, 1990. – 231 с.
3. Зенкевич, О.С. Метод конечных элементов в технике / О.С. Zienkiewicz. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
4. Абрамов, Ф.А. Рудничная аэрогазодинамика / Ф.А. Абрамов. – М.: Недра, 1972. – 274 с.
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.