

work. Preliminary laboratory working of the technology elements was conducted on snow models. The models were produced and prepared for the imitation of gas hydrate structure. The research confirmed the possibility of formation of ice hydrate blocks with necessary characteristics and properties. The temperature and pressure conditions required for formation of ice crust on the surface of the models were determined. The ranges of such parameters were selected for the gases of different initial temperature and composition. The features of icy crust

formation were considered depending on the method of refrigeration of gas hydrate cylinder. Time required for adiabatic and convective cooling process was calculated. The empirical models of cooling processes are offered.

Keywords: *icy gas hydrate block, hydrate generating gas, gas hydrate, porosity, cooling, freezing, heat conductivity*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.С. Пригуновим. Дата надходження рукопису 02.06.11

УДК 622.235

**А.П. Круковский, канд. техн. наук,
В.В. Круковская, канд. техн. наук**

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: igtm@ua.fm

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ С АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ ПРИ ПРОХОДКЕ БУРОВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ

**A.P. Krukovskiy, Cand. Sci. (Tech.),
V.V. Krukovskaya, Cand. Sci. (Tech.)**

N.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: igtm@ua.fm

RESEARCH OF THE STRESS CONDITION OF MASSIF AROUND MINE WORKING WITH BOLTING AT THE DRIVE WORKING BY BLAST-HOLE DRILLING

Опыт проведения горных выработок с анкерной крепью во многих зарубежных странах и на Украине показывает, что современная технология анкерного крепления обеспечивает их устойчивость и надежность при длительной эксплуатации в самых разнообразных условиях применения. Одним из основных требований технологии установки является возведение анкерной крепи в неразгруженный от горного давления вмещающий массив в непосредственной близости от забоя выработки. Тогда сразу же после установки она будет вовлечена в работу по противодействию силам горного давления и приконтурный массив максимально сохранит природное монолитное состояние. Если выработка проводится комбайновым способом, выполнить это условие несложно, при работе проходческого комбайна разрушение пород кровли минимально, и своевременная установка очередного ряда анкеров дает необходимый эффект. Но в некоторых случаях применяется буровзрывной способ проходки, нарушающий природную монолитность пород. Определение поля напряжений вокруг забоя выработки с анкерной крепью перед, в момент и после взрывания шпуровых зарядов, позволит оценить влияние взрыва на устойчивость крепи, ее способность удерживать породы кровли в ненарушенном состоянии. В связи с этим целью работы является исследование состояния кровли выработки, закрепленной анкерной крепью и проводимой буровзрывным способом, при помощи методов математического моделирования и анализа данных шахтных экспериментов и наблюдений. В данной статье приведены результаты численного моделирования геомеханических и фильтрационных процессов вокруг горной выработки, закрепленной анкерной крепью, во время взрывания шпуровых зарядов. Проанализировано состояние незакрепленной кровли над забоем выработки при различных значениях отставания анкерной крепи от забоя. Показано, что анкерная крепь препятствует расслоению и разрушению пород кровли даже при ведении буровзрывных работ.

Ключевые слова: *анкерная крепь, буровзрывной способ проходки выработки, численное моделирование*

Известно, что системы анкерной крепи (АК) обеспечивают устойчивость и надежность при длительной эксплуатации подготовительных и капитальных выработок в самых разнообразных условиях применения [1, 2]. Одним из основных требований технологии их установки является возведение АК в неразгруженный от горного давления вмещающий

массив. Тогда сразу же после установки АК будет вовлечена в работу по противодействию силам горного давления и приконтурный массив максимально сохранит природное монолитное состояние. В противном случае анкера будут выполнять только роль сшивания расслоившихся пород кровли.

Если выработка проводится комбайновым способом, выполнить вышеназванное условие несложно, при работе проходческого комбайна разрушение пород кровли минимально, и своевременная установка

очередного ряда анкерів дає необхідний ефект. Но в деяких випадках, наприклад, при проведенні виробки по вибросоопасному пласту, застосовується буровзрывной способ проходки, порушуючий природну монолітність порід. Визначення поля напружень навколо забою виробки з анкерної кріпкою перед, в момент і після взривання шпурових зарядів дозволить оцінити вплив взриву на стійкість АК, її здатність утримувати породи кровлі в ненарушеному стані.

Цель работы. Використовуючи методи математического моделювання і результати шахтних експериментів і спостережень, дослідити стан кровлі виробки, закріпленої анкерної кріпкою і проведеною буровзрывным способом.

Математическая постановка задачи. Нестационарное напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки описывается системой уравнений

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

де $\sigma_{ij,j}$ – похідні від компонент тензора напружень по x, y ; t – час; $X_i(t)$ – зовнішні сили; $Y_i(t)$ – сила впливу взрывной хвилі; $T_i(t)$ – сили, викликані внутрішнім тертям, $T_i(t) = -c_g \frac{du_i}{dt}$; c_g – коефіцієнт демпфування, визначається експериментально; $P(t)$ – сила утвореної при взриві газу, діююча на масив; u_i – переміщення; ρ_n – густина породи.

Для математического описання процесу переходу горних порід в порушене стані застосовується умова міцності Кулона-Мора, яке враховує можливість виникнення руйнування як в результаті сдвигу, так і в результаті отриву.

Движение газа в порушенном массиве описывается системой уравнений

$$\mu_g \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q(t) = 0; \quad (2)$$

$$k = k_{техн} + k_{тект}; \quad k_{техн} = f(\sigma_{ij}, t),$$

де μ_g – в'язкість газу; p – його тиск; $q(t)$ – інтенсивність джерел газовиділення; k – повне поле коефіцієнтів проникності порід; $k_{техн}$ – технологічна проникність, викликана перерасподіленням поля напружень в результаті проведення горної виробки; $k_{тект}(x, y)$ – початкова, тектонічна проникність.

Для оцінки напруженого стану використовуються геомеханічні параметри $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$ і $P = \sigma_3 / \gamma H$, характеризуючі ступінь різнокомпонентності поля напружень і можливість крихкого руйнування горних порід.

Начальні і граничні умови для даної задачі

$$\begin{aligned} \sigma_{yy} \Big|_{t=0} &= \gamma H; \\ \sigma_{xx} \Big|_{t=0} &= \lambda \gamma H; \quad p \Big|_{t=0} = 0,8 \cdot \gamma_{води} h; \\ \sigma_{zz} \Big|_{t=0} &= \lambda \gamma H; \quad p \Big|_{\Omega_3(t)} = 0,8 \cdot \gamma_{води} h; \\ u_x \Big|_{\Omega_1} &= 0; \quad p \Big|_{\Omega_4} = p_v; \quad p_v = 0,1 \text{ МПа}, \\ u_y \Big|_{\Omega_2} &= 0; \end{aligned} \quad (3)$$

де γ – середня густина вишележачих горних порід; H – глибина розробки; λ – коефіцієнт бокового розпора; $\Omega_1(t)$ – вертикальні межі зовнішнього контуру; Ω_2 – горизонтальні межі зовнішнього контуру; $\gamma_{води}$ – густина води; $\Omega_3(t)$ – змінювана в часі межа області фільтрації; Ω_4 – внутрішній контур (виробка); p_v – тиск повітря в виробці.

Для моделювання дії взриву в нашій задачі необхідно задати тиск газів p_0 в точці взриву. Тиск на стінки шпура рівно [3]

$$p_0 = p_d / 2,$$

де p_d – детонаційний тиск, визначає величину імпульсу і бризантне дієвість взрывных веществ (ВВ).

Детонаційний тиск – один з основних параметрів ударних хвиль. Значення тиску детонації були виміряні авторами [3] для трьох типів промислових ВВ. Виходячи з отриманих даних, можна сказати, що $p_d = 1500 \div 24000 \text{ МПа}$. Тобто, к початковим умовам (3) додається наступне

$$p \Big|_{t=t_{взр}, x=x_{взр}, y=y_{взр}} = \frac{p_d}{2}, \quad (4)$$

де $t_{взр}$ – момент взриву; $x_{взр}, y_{взр}$ – координати центру взриву.

Так як рівняння (1), (2) з початковими і граничними умовами (3), (4) аналітичного рішення не мають, будемо використовувати метод кінцевих елементів. Щоб отримати рішення на визначеному часовому проміжку, застосовується кінечно-різностний метод. При цьому вважається, що в початковий момент часу $t = 0$ розподіл напружень задано, і для достатньо малих значень Δt , з допомогою ітераційних співвідношень, отримуємо розподіл напружень на момент часу $t + \Delta t$. Цей процес продовжується від початкового стану до будь-якого поточного моменту часу.

В момент взривання заряду во врубівому шпурі в масиві починає поширюватися хвиля стиснення, накладаючи на існуюче поле напружень додаткові напруження, викликані взривом. Для розрахунок радіальної і тангенціальної складових хвилі напружень при взриві концентрованого заряду, в діапазоні відстаней $r = (20 \div 100) R_0$, де R_0 – радіус

заряда, будем использовать зависимости, полученные для крепких горных пород на основании лабораторных и натурных экспериментальных данных Боровиковым В.А. и Ванягиным И.Ф. [4]. 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.

Максимальные значения радиальных и тангенциальных напряжений на различном расстоянии от точки единичного взрыва, рассчитанные по формулам Боровикова В.А., Ванягина И.Ф., показаны на рис. 1.

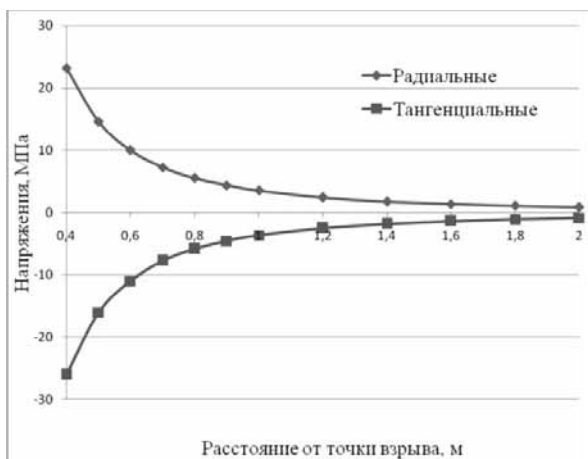


Рис. 1. Максимальные напряжения, горизонтальное направление

Физическая постановка задачи. Западный фланговый вентиляционный ходок № 23 пласта i_3^1 , горизонт 915 м, ПАО „Краснодонуголь“ СП „Шахтоуправление „Суходольское-Восточное“ проводится по угольному пласту сложного трехпачечного строения, разделяющий прослой – алевролит, рис. 2, табл. 1.

Основная и непосредственная кровли представлены малоустойчивыми алевролитами, неустойчивыми

в нижней части, что может спровоцировать обрушение на высоту до 1,0 м. Угольный пласт опасен по внезапным выбросам угля и газа и выдавливанию.

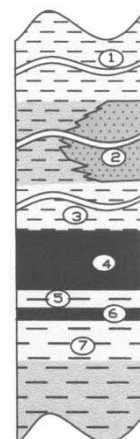


Рис. 2. Стратиграфическая колонка: условные обозначения см. табл. 1

Таблица 1

Свойства пород

№	Наименование пород	Мощность, м	Коэф. крепости	Газоносность, м ³ /т.
1	Алевролит	7,2-9,6	4-6	–
2	Песчаник	11,0-13,6	7-9	1,5
3	Алевролит	8,1-25,8	4-6	–
4	Уголь i_3^1	1,3-1,76	1,5	22,5
5	Алевролит	0,1-0,4	4-6	–
6	Уголь i_3^3	0,2-0,4	1,5	22,5
7	Алевролит	10,0-13,0	4-6	–

Вентиляционный ходок №23 крепится анкерной крепью по следующей схеме, рис. 3. Анкера устанавливаются с наклоном 75° на забой выработки.

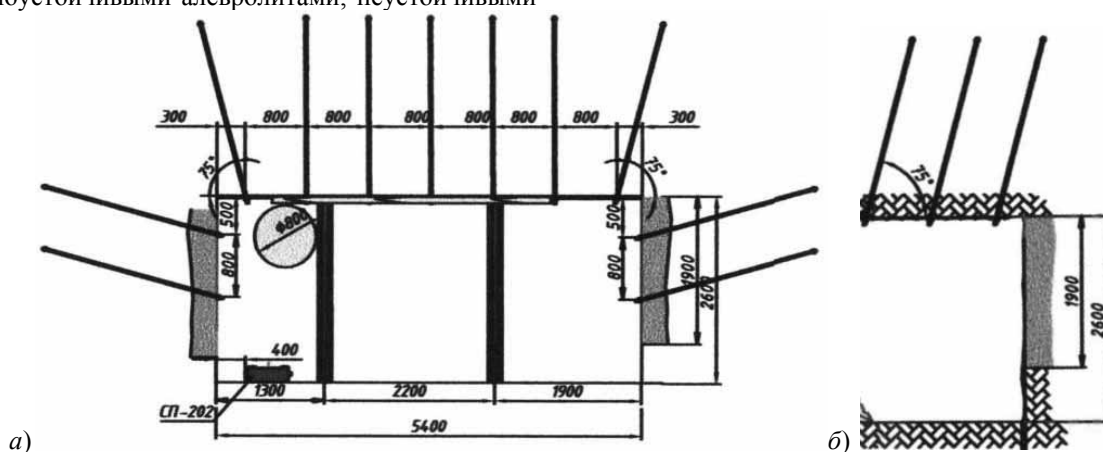


Рис. 3. Схема установки анкерной крепи: а) поперечное сечение; б) продольное

Способ проведения выработки – буровзрывной, в режиме сотрясательного взрывания. Схема расположения шпуров представлена на рис. 4. Тип применяемого взрывчатого вещества – П-5; Ф-5; 10П; 13П, величина за-

ряда каждого шпура – 0,6 кг, взрывание производится за 1 прием. Количество шпуров – 18 по углю и 6 по породе, глубина – 2,0 м. Подвигание забоя – 1,8 м. Свойства пород, используемые при расчетах, приведены в табл. 2.

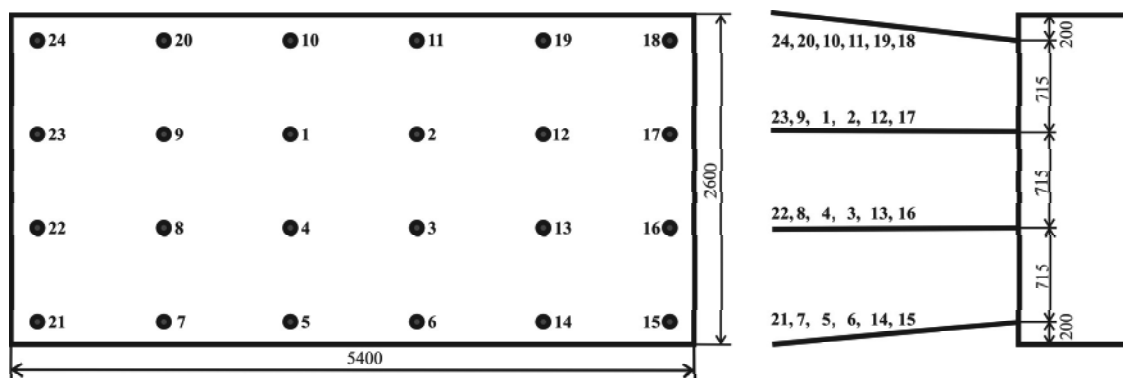


Рис. 4. Схема расположения шпуров

Таблица 2

Характеристики породы

Порода	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Прочность на сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа	Прочность на растяжение, σ_p , МПа	Плотность, kg/m^3	Скорость звука в породе, м/с
Алевролит	2500	0,35	55	7	2000	$5 \cdot 10^3$
Уголь	500	0,30	15	1	1250	$3 \cdot 10^3$

Рассмотрим продольное сечение, конечно-элементная сетка для которого показана на рис. 5.

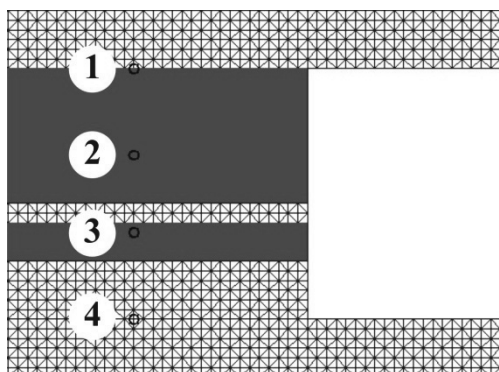


Рис. 5. Центральный фрагмент конечно-элементной сетки с забоем выработки, угольными пластами и зарядами ВВ: 1–4 – номера зарядов

Анализ результатов расчета. При выполнении расчета получим распределение значений компонент тензора главных напряжений и параметры зоны неупругих деформаций. На рис. 6 показано распределение значений параметра Q , на рис. 7 – 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. 7, б). 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. 6, б.

На следующей временной итерации, рис. 5, в, 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 $Q < 0,4$. Этот момент времени очень благоприятен для установки следующих рядов АК.

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 вглубь массива, рис. 6, з. При этом видно, как нагружается первый анкер – напряжения в нем со временем значительно возрастают. Если проводить установку следующих рядов АК с запаздыванием, то АК уже не сможет вернуть вмещающему массиву утраченную монолитность, качественное породно-анкерное перекрытие не будет сформировано, анкера, в лучшем случае, скрепят расслоившиеся породы и предотвратят их от высыпания.

Кроме этого видно, рис. 6, что параметр Q достигает максимальных значений в области четвертого заряда, в аргиллите, как более прочной, по сравнению с углем, среде.

Исследуем, как влияет параметр „отставание установки ряда анкеров от забоя выработки“ на напряженное состояние пород кровли. Для этого проведем аналогичный расчет для случаев, когда отставание АК от забоя составляет 1,1 и 1,9 м.

Сравнение расчетных данных показывает, что минимизация отставания Δl имеет важное значение для сохранения в кровле выработки над забоем природного напряженного состояния. Установленный вплотную к забою анкер препятствует разгрузке пород кровли от горного давления и росту зоны повышенной трещиноватости как при взрывании, так и в дальнейшем при проведении выработки.

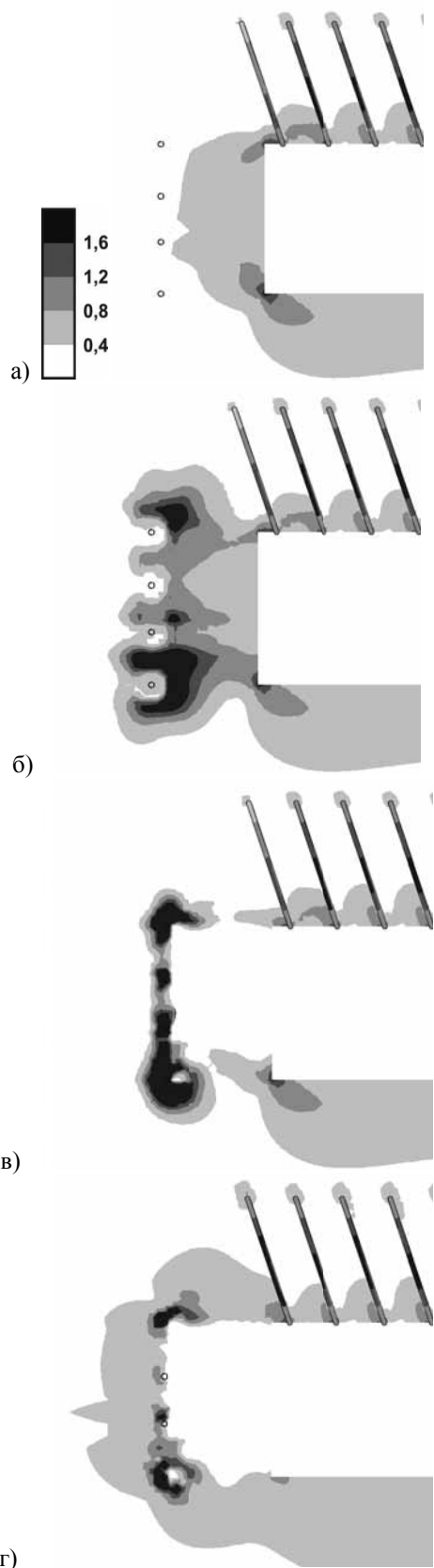


Рис. 6. Распределение значений параметра Q при $\Delta l = 0,3$ м: а) перед взрыванием зарядов; б) в момент взрыва; в) на следующей итерации после взрывания; г) через 30 итераций

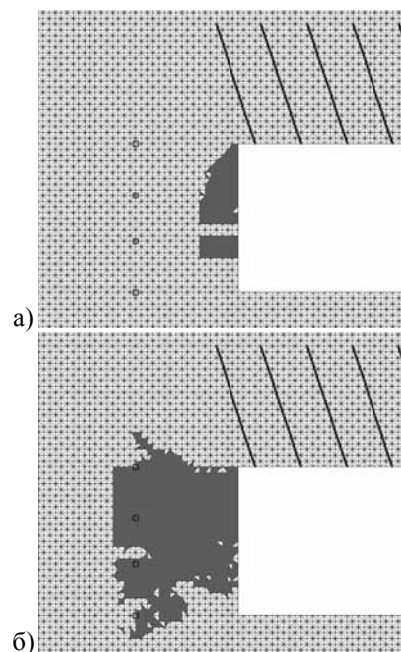


Рис. 7. Зоны неупругих деформаций: а) перед взрыванием зарядов; б) в момент взрыва

Построим графики изменения во времени среднего значения геомеханических параметров Q , рис. 8, и P , рис. 9, в незакрепленной кровле над забоем выработки в зависимости от величины отставания АК от забоя. Взрывание шпуровых зарядов происходит одновременно на 40-й временной итерации.

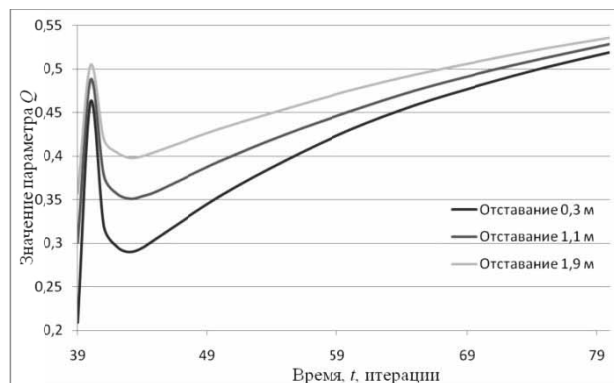


Рис. 8. Изменение значения параметра Q в незакрепленной части кровли над забоем

Хорошо видно, что с увеличением отставания Δl значения параметра Q увеличиваются – растет разнокомпонентность поля напряжений незакрепленной кровли, а значения параметра P уменьшаются, что говорит о разгрузке этой части массива. При увеличении отставания Δl на каждые 0,8 м, разнокомпонентность незакрепленного участка кровли увеличивается на 15–20%, разгрузка от горного давления – на 10–11%.

Результаты расчетов на основе разработанной математической модели были использованы при разработке рекомендаций по схемам и технологии установки анкеров при проведении Западного флангового вентиляци-

онного ходка № 23 шахты СП „Шахтоуправление „Суходольское-Восточное“ ПАО „Краснодонец““.

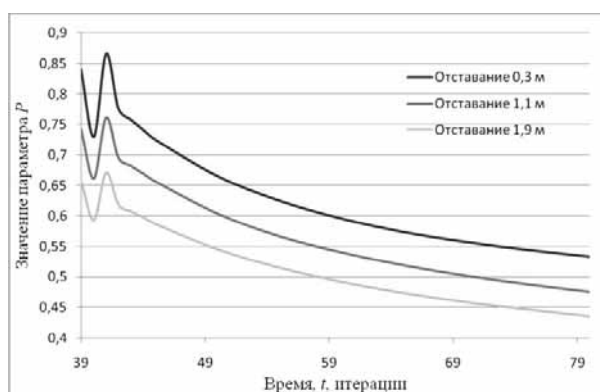


Рис. 9. Изменение значения параметра P в незакрепленной части кровли над забоєм

По результатам проведенной работы можно сделать следующие **выводы**:

1. Разработана адекватная математическая модель связанных процессов изменения напряженно-деформированного состояния массива вокруг выработки с АК, фильтрации газа в нарушенной геосреде и взрыва шпуровых зарядов в забое выработки.

2. Анкерная крепь препятствует расслоению и разрушению пород кровли даже при ведении буровзрывных работ.

3. Увеличение отставания ряда анкерной крепи от забоя, при проведении выработки буровзрывным способом, приводит к увеличению значения параметра Q в незакрепленной части кровли – растет разнокомпонентность поля напряжений, и уменьшению значения параметра P , что говорит о разгрузке этой части массива.

4. Установку АК необходимо производить как можно быстрее после выемки породы; на момент проведения взрывных работ отставание АК от забоя не должно превышать 30–40 см.

Список литературы / References

1. Булат А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов / Ин-т геотехнической механики НАН Украины. – Днепропетровск: 2002. – 372 с.

Bulat, A.F. and Vinogradov, V.V. (2002), *Oporno-ankernoe krepnenie gornykh vyrobotok ugolnykh shakht* [Roof Bolting in Mine Workings of Coal Mines], Institute of Geotechnical Mechanics NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, 372 p.

2. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги. – К.: Мінвуглепром України, 2008. – 83 с.

“System of providing reliable and safe operation in the mine workings by means of roof bolting. The general technical requirements”, (2008), Ministry of coal industry of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 83 p.

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

Yefremov, E.I., Haritonov, V.N. and Semenyuk, I.A. *Vzryvnoe razrushenie vybrosopasnykh porod v glubokikh shakhtakh* [Explosive Destruction of Outburst-Prone Rock in Deep Mines], Nedra, Moscow, Russia, 256 p.

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

Borovikov, V.A. and Vanyagin, I.F. (1990), *Modelirovanie deystvia vzryva ghb hfphieitybb gornykh porod* [Modeling of Blast Action During Destruction of Rocks], Nedra, Moscow, Russia, 231 p.

Досвід проведення гірничих виробок з анкерним кріпленням у багатьох іноземних країнах та в Україні свідчить, що сучасна технологія анкерного кріплення гарантує їх стійкість та надійність при тривалій експлуатації в самих різноманітних умовах застосування. Однією з основних вимог технології установки є зведення анкерного кріплення в нерозвантажений від гірського тиску масив у безпосередній близькості від вибою виробки. Тоді відразу ж після установки анкерне кріплення буде втягнене в роботу по протидії силам гірського тиску, приконтурний масив максимально зберігатиме природний монолітний стан. Якщо виробка проводиться комбайновим способом, виконати цю вимогу неважко, бо при роботі прохідницького комбайну руйнування порід покрівлі мінімальне, а своєчасне встановлення чергового ряду анкерів дає необхідний ефект. Але в деяких випадках застосовується буропідрильний спосіб проходки, що порушує природну монолітність порід. Визначення поля напружень навколо вибою виробки з анкерним кріпленням перед, у момент і після підривання шпурових зарядів, дозволить оцінити вплив вибуху на стійкість анкерного кріплення, його здатність утримувати породи покрівлі в непорушеному стані. У зв'язку з цим, метою роботи є дослідження стану покрівлі виробки з анкерним кріпленням, що проводиться буропідрильним способом, за допомогою методів математичного моделювання та аналізу даних шахтних експериментів і спостережень. У цій статті наведено результати чисельного моделювання геомеханічних і фільтраційних процесів навколо гірничої виробки з анкерним кріпленням, під час підривання шпурових зарядів. Проаналізовано стан незакріпленої покрівлі над вибоєм виробки при різних значеннях відставання анкерного кріплення від вибою. Показано, що анкерне кріплення перешкоджає розшаруванню та руйнуванню порід покрівлі навіть при веденні буропідрильних робіт.

Ключові слова: анкерне кріплення, свердловивбуховий спосіб проведення виробки, чисельне моделювання

Foreign and Ukrainian experience of application of modern roof bolting technology during mining shows that it provides stability and reliability of tunnels for continuous service in different use environment. One of the requirements of roof bolting installation is mounting it in loaded by rock pressure enclosing rock massif in immediate vicinity of coal face. It allows best preservation of natural monolithic state of marginal rock due to involvement of installed roof bolting into rock pressure resistance work. When the excavation is carried by means of mining combine, it is easy to install another row of

anchors in time because destruction of the roof rocks is minimal and work gives the necessary effect. But in case of blast-hole drilling, excavation work breaks natural monolithic rock. Determination of the stress field around the coal face before, during and after explosion of blast-hole charges will allow estimation of the impact of the explosion on the stability of roof bolting and its ability to keep roof rocks in an undisturbed state. Thus the purpose of the research was the study of state the roof rocks fixed by the roof bolting in an excavation made by method of blast-hole drilling by means of mathematical modeling and mining experiments and observations data analysis. The article presents the results of numerical

modeling of geomechanical and filtration processes around the mine working fixed by the roof bolting during explosion of blast-hole charges. The state of unfixed roof over the coal face with different delays of roof bolting installation from the coal face was done. It is shown, that roof bolting prevents rock foliation and destruction of the roof rocks even in an excavation made by method of blast-hole drilling.

Keywords: *roof bolting, blast-hole drilling, numerical modeling*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук С.І. Скіпочкою. Дата надходження рукопису 04.08.11

УДК 556.322.63.001.57

Д.В. Рудаков¹, д-р техн. наук, ст. научн. сотр.,
И.А. Садовенко¹, д-р техн. наук, проф.,
А.В. Инкин¹, канд. техн. наук, доц.,
З.Н. Якубовская², канд. техн. наук

1 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: inkin@ua.fm

2 – Государственное высшее учебное заведение „Украинский государственный химико-технологический университет“, г. Днепропетровск, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ ПРИ АККУМУЛЯЦИИ И ОТБОРЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

D.V. Rudakov¹, Dr. Sci. (Tech.), Senior Research Fellow,
I.A. Sadovenko¹, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
A.V. Inkin¹, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Z.N. Yakubovskaya², Cand. Sci. (Tech.)

1 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: inkin@ua.fm

2 – State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Engineering”, Dnipropetrovsk, Ukraine

MODELING OF HEAT TRANSPORT IN AN AQUIFER DURING ACCUMULATION AND EXTRACTION OF THERMAL ENERGY

Сезонная неравномерность потребления и ограниченность запасов природных энергоносителей в Украине приводит к необходимости поиска нетрадиционных способов добычи и хранения тепловой энергии. В сформированных горно-геологических и климатических условиях страны снижение энергетических нагрузок может быть достигнуто за счет создания систем подземного аккумулирования теплоносителей. Эти системы обеспечат отопление, горячие водоснабжение и кондиционирование инженерных сооружений за счет сохранения летнего тепла и зимнего холода в водоносных пластах. Эффективность применения данной геотехнологии должна быть обоснована численным моделированием фильтрации и теплопереноса в пласте, используемом в качестве коллектора.

Цель работы. Обоснование применения данной геотехнологии математическим моделированием фильтрации и теплопереноса в водоносном горизонте, который используется как коллектор нагретой и охлажденной воды. Вычислительная реализация математической модели была выполнена с помощью программы ModFlow 2009 (Schlumberger W.S.). Тестирование модели выполнено на основе аналитического решения задачи радиального теплопереноса. Максимальные отклонения между профилями температуры, рассчитанными двумя методами, не превышают 2 °C (менее 10% от разности температур) и характерны только для зоны раздела теплой и холодной воды (в полосе шириной 15–20 м). С течением времени отклонение между численным и аналитическим решением не возрастает. Оцененная погрешность модели может считаться приемлемой для решения практических задач.

На основе численного анализа теплового баланса установлено, что к моменту завершения закачки в водоносном горизонте остается более 98% тепла, поступившего через скважину, в диапазоне реальных значений коэффициента теплопроводности пласта. Показано, что суммарные потери тепла через кровлю и подошву в период закачки, для принятых исходных данных, отличаются незначительно. Более заметны отличия между потерями тепла в течение следующего периода: после паузы и последующей откачки. Так, в результате откачки эквивалентного объема воды, с тем же дебитом и в течение того же периода, через скважину удается отобрать от 62 до 74% исходной тепловой энергии, в зависимости от значений коэффициента теплопроводности пласта.

Ключевые слова: *теплоперенос, аккумуляция, водоносный горизонт, тепловая энергия, моделирование*

Введение. Сезонная неравномерность потребления топлива в Украине и ограниченность его запасов при-

водит к необходимости эффективного использования альтернативных источников тепловой энергии. В условиях сложившейся структуры энергопотребления и климатических условий страны, перспективной техно-