

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ В ВЫРАБОТКУ С АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ

А. Круковский^{1*}, В. Круковская², Ю. Виноградов³

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр, Украина

²Отдел управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр, Украина

³Отдел физики сорбционных процессов, Институт физики горных процессов НАН Украины, Днепр, Украина

*Ответственный автор: e-mail igtm@ukr.net, тел. +380508372108

MATHEMATICAL MODELING OF UNSTEADY WATER FILTRATION INTO ANCHORED MINE OPENING

O. Krukovskyi^{1*}, V. Krukovska², Yu. Vynohradov³

¹Institute of Geotechnical Mechanics named after M.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

²Department of Dynamic Phenomena Management of Rock Pressure, Institute of Geotechnical Mechanics named after M.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

³Department for Physics of Sorption Processes, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: e-mail igtm@ukr.net, tel. +380508372108

ABSTRACT

Purpose. To develop a mathematical model of the interrelated processes of coal-rock mass deformation and water filtration in the disturbed area to study the change in the value of water inflow into the mine working depending on the method of its supporting.

Methods. In this research, we used methods of rigid body mechanics, fluid and gas mechanics as well as numerical simulation based on the finite element method.

Findings. A mathematical model of water filtration in the deformed rock mass was developed. It is shown that the use of bolting prevents fracturing process in the zone subjected to the influence of the mine working. In this case, solidity of the virgin mass in the roof is maximally preserved. Significant reduction of the filtration area and decrease in its permeability leads to the drop in intensity of the liquid filtration movement and prevents or reduces water inflow into the mine workings with anchor support.

Originality. Bolting is considered as a technological method of reducing water inflow into mine workings for the first time. Based on the results obtained, the “Method for Reducing Water Inflow into the Mine Workings with the Roof Bolting” was developed. Effectiveness of this method was proved in the coal mines of the Western Donbas.

Practical implications. The calculations show that bolting can simultaneously perform two functions: ensuring stability of the mine working and its waterproofing, which significantly reduces the operating costs.

Keywords: deformation of the coal-rock mass, permeability, water filtration, numerical simulation

1. ВВЕДЕНИЕ

Трудно переоценить значение Западного Донбасса для современной Украины в условиях значительного сокращения количества угольных предприятий. Для обеспечения энергетической независимости экономики страны необходима интенсификация угледобычи. Однако, в строении продуктивной толщи района имеется большое количество водоносных горизонтов, которые в той или иной степени угрожают безопасности и повышают сложность проведения горных выработок. Многие осложнения и аварии

в горных выработках связаны с водопроявлениями при подработке водоносных пород. Поэтому для Западного Донбасса актуальна задача прогноза водопритоков и уменьшения их пагубного влияния на состояние горных выработок.

Цель данной работы – разработать математическую модель связанных процессов деформирования углепородного массива и фильтрации воды в нарушенной области для исследования изменения величины водопритока в горную выработку в зависимости от способа ее крепления.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Фильтрация воды – это движение свободной воды, происходящее под действием сил тяжести или давления, создаваемого в поровой среде внешними нагрузками. При этом фильтрация происходит из областей с более высоким давлением в области более низкого давления (Alikin, Litvin, Scherbakov, & Borodavkin, 1992). Источником давления, которому подвержены жидкости в трещинно-поровом пространстве, является обжатие горных пород после первоначального осадкообразования под действием силы тяжести (Masket, 2004).

Уравнения неразрывности фильтрационного потока можно представить в виде (Zienkiewicz & Taylor, 2000; Abramov & Shevelev, 1972):

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где:

p – давление жидкости, МПа;

k_x, k_y – коэффициенты проницаемости в направлении осей x и y , мДа;

x, y – горизонтальная и вертикальная координаты точки области, м.

Начальные и граничные условия:

$$p|_{t=0} = p_0(y), \quad p_0 = \rho g(H - y);$$

$$p|_{\Omega_1} = p_1; \quad (2)$$

$$p|_{\Omega_2} = p_2,$$

где:

p_0 – давление в начальный момент времени в определенной точке исследуемой области, МПа;

ρ – плотность воды, кг/м³;

H – глубина разработки, м;

Ω_1 – область обводненных вмещающих пород;

Ω_2 – контур выработки;

p_1 – давление воды в обводненном породном слое;

p_2 – давление воды на контуре выработки.

Фильтрационная проницаемость среды является важнейшей характеристикой, определяющей значение параметров процесса фильтрации. Коэффициент проницаемости породы характеризует пропускную способность сухой породы в отношении любой однородной жидкости или газа в условиях вязкого потока; он зависит исключительно от строения самой породы (Geological dictionary, 1978). Известно, что проницаемость горных пород зависит также от напряженно-деформированного состояния, в котором они находятся, поэтому для решения задач о фильтрации воды в зоне ведения горных работ необходимо выполнить расчет поля напряжений в исследуемой области.

Изменение во времени напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки описывается системой уравнений (Ivanov, Volchok, Bogulskiy, Anisimov, & Kurguzov, 2002; Krukovskiy, 2012):

$$c_g \frac{\partial}{\partial t} u_i = \sigma_{ij,j} + X_i(t) + P_i(t), \quad (3)$$

где:

u_i – перемещения, м;

c_g – коэффициент демпфирования, кг/с/м³;

$\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y , МПа/м;

$X_i(t)$ – проекции внешних сил, действующих на единицу объема твердого тела, Н/м³;

$P_i(t)$ – проекции сил, обусловленных давлением флюидов в трещинно-поровом пространстве, Н/м³.

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma H; & u_x|_{\Omega_3} &= 0; \\ \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma H; & u_y|_{\Omega_4} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где:

γ – усредненный вес вышележащих пород, Н/м³;

λ – коэффициент бокового распора;

Ω_3 – вертикальные границы внешнего контура;

Ω_4 – горизонтальные границы внешнего контура.

Задача решается в упругопластической постановке. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора, которое учитывает возможность возникновения разрушения в результате как сдвига, так и отрыва.

Для анализа напряженно-деформированного состояния породного массива в работе используются

геомеханические параметры: $Q^* = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\gamma H}$, харак-

теризующий разнокомпонентность поля напряжений,

и $P^* = \frac{\sigma_3}{\gamma H}$, характеризующий разгрузку массива от

горного давления.

Для расчета проницаемости в горном массиве вокруг выработки с учетом его напряженного состояния будем считать, что (Krukovska, Krukovskiy, & Vinogradov, 2015):

– в нетронутом горном массиве $k = 0$ при $Q^* < 0.6$;

– в зоне упругих деформаций и равнокомпонентного сжатия (при $Q^* < 0.7$; $P^* > 0.25$) $k = 0$;

– в области начального трещинообразования отдельные трещины не связаны друг с другом, при $0.7 < Q^* < 0.8$ $k = k_{\min}$;

– в области интенсивного трещинообразования имеет место неуправляемый рост трещин, на данной стадии быстро увеличиваются деформации за счет распространения трещин и разрыхления (Vinogradov, 1989). В области интенсивного трещинообразования происходит рост коэффициента проницаемости на 2 – 3 порядка в различных породах и материалах. В этой зоне при $Q^* > 0.8$ $k = e^{0.26Q^* - 4.65}$;

– в области разрушения горных пород происходит резкое увеличение проницаемости $k = k_{\max}$, при $P^* < 0.1$; $Q^* > 0.8$.

Связанная задача фильтрации воды в деформируемом массиве (1), (3) с начальными и граничными условиями (2), (4) решается с использованием метода конечных элементов (Alikin, Litvin, Scherbakov, & Borodavkin, 1992; Zienkiewicz & Taylor, 2000). В результате решения получим значения напряжений и

деформаций, зоны неупругих деформаций, значения давления воды, скоростей ее фильтрации и расходов в каждой точке исследуемой области.

Для примера рассмотрим проведение капитальной выработки с сечением КШПУ-14.4 на глубине 400 м

с рамной и анкерной крепью. Характеристики углей и вмещающих пород приведены в Таблице 1. Давление воды в угольном пропластке – 3.5 МПа. Стратиграфическая колонка, конечно-элементная сетка и схема анкерного крепления показаны на Рисунке 1.

Таблица 1. Характеристика углей и вмещающих пород

Описание пород	Удельный вес, т/м ³	Предел прочности, МПа		Удельная трещиноватость, тр/пм
		в естественном состоянии	при влагонасыщении	
Песчаник	2.60	26.5	11.7	8 – 10
Аргиллит	2.30	23.6	2.4	6 – 8
Уголь обводненный	1.26	32.4	27.4	15 – 20

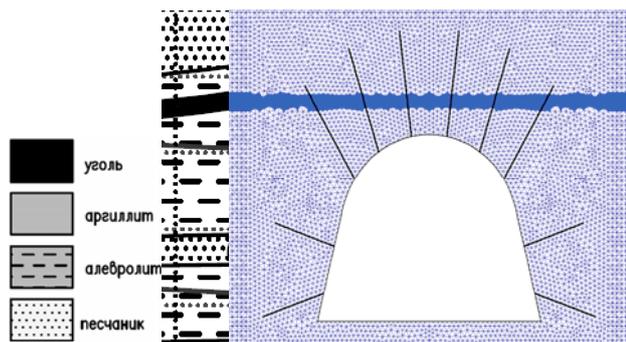


Рисунок 1. Центральный фрагмент конечно-элементной сетки

С использованием приведенных выше соотношений получены распределения значений коэффициентов проницаемости породного массива вокруг выработок с рамной (Рис. 2) и анкерной крепью (Рис. 3), на различных временных итерациях i . На рисунках показаны также направления движения фильтрационных потоков.

Можно видеть, что со временем размеры области фильтрации вокруг выработки увеличиваются. Это обусловлено развитием зоны повышенной трещиноватости, расслоением и разрушением вмещающих пород. Вокруг выработки образуется водопроницаемая область.

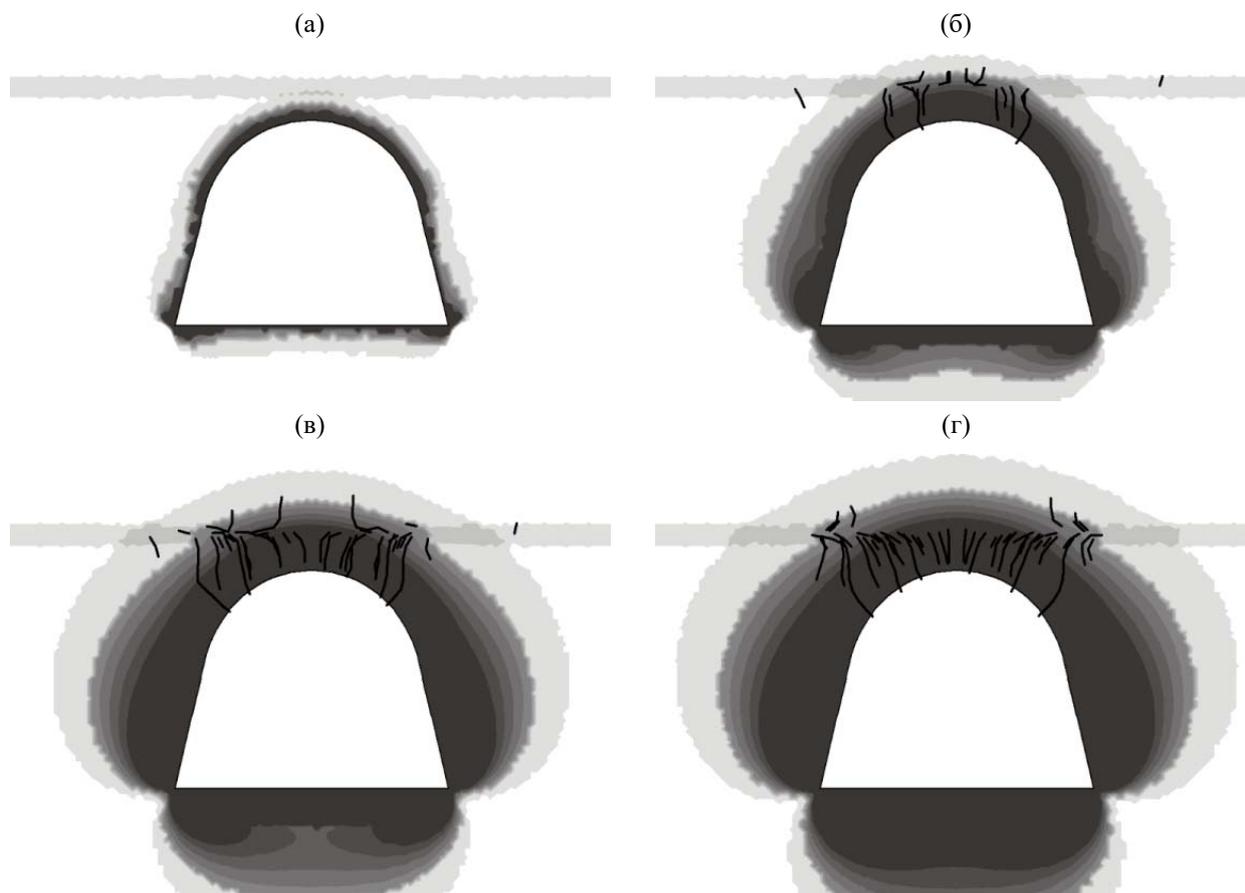


Рисунок 2. Распределение значений коэффициентов проницаемости породного массива и направления движения фильтрационных потоков, выработка с рамной крепью: (а) $i = 1$; (б) $i = 5$; (в) $i = 15$; (г) $i = 30$

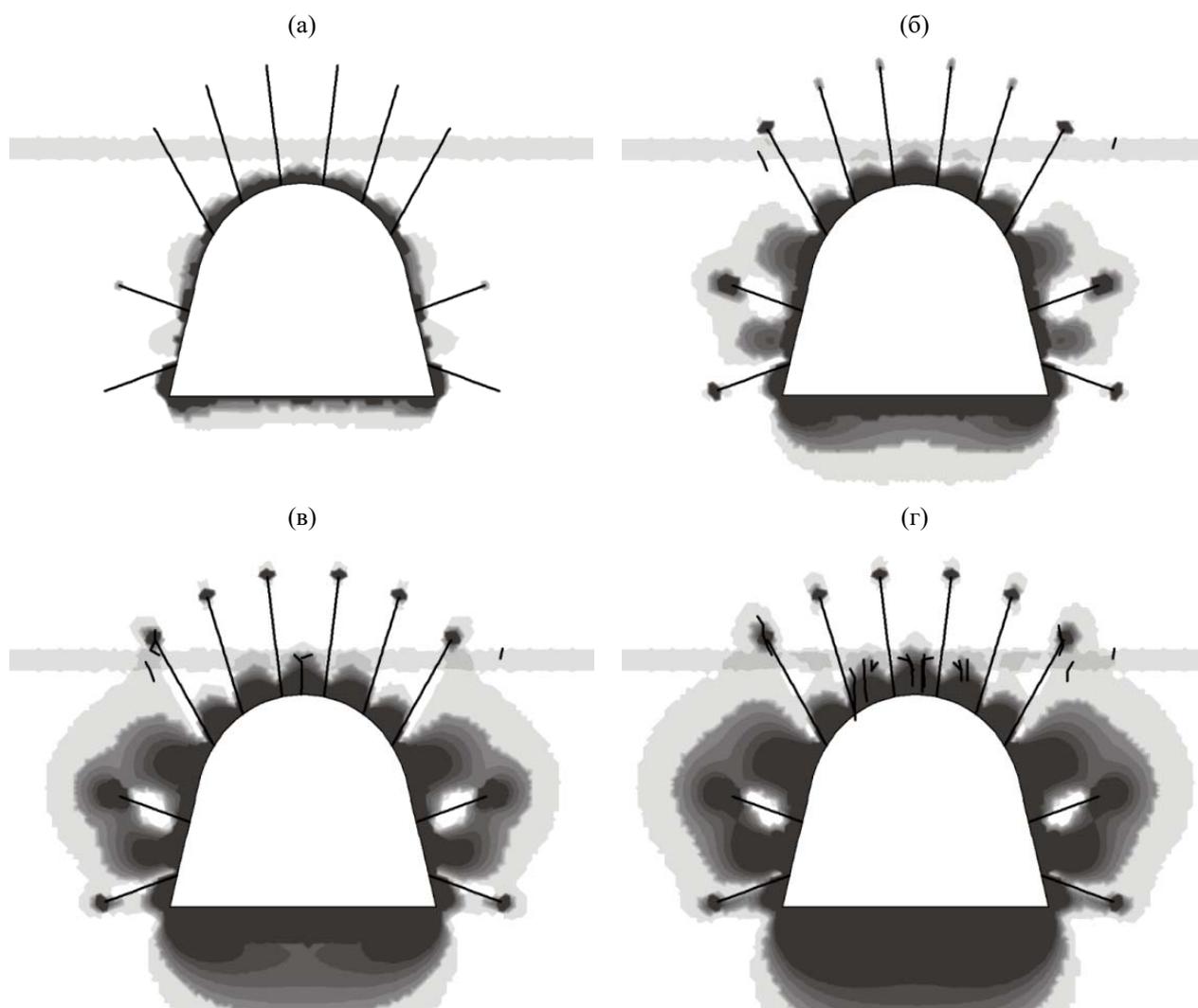


Рисунок 3. Распределение значений коэффициентов проницаемости породного массива и направления движения фильтрационных потоков, выработка с анкерной крепью: (а) $i = 1$; (б) $i = 5$; (в) $i = 15$; (г) $i = 30$

С течением времени эта область захватывает водоносный угольный пропласток (Рис. 2б – г), вода из которого начинает перемещаться внутрь выработки. Так как водоносный слой расположен близко к выработке, это происходит довольно быстро. На Рисунке 2б обводненный угольный пропласток расположен на самом краю области фильтрации, в зоне начала трещинообразования. На Рисунке 2в, г – в зоне интенсивной трещиноватости. При $i = 30$ (Рис. 2г), длина области пересечения обводненного пропластка и повышенной проницаемости (темно-серый цвет) равна ширине выработки.

На Рисунке 3 видно, как изменяются контуры области фильтрации, если в кровле и боках выработки установлены анкера. Область пересечения обводненного пропластка и повышенной проницаемости (темно-серый цвет) очень мала даже при $i = 30$. Проницаемая зона в кровле выработки не превышает 0.3 – 0.5 м вглубь массива. Если бы обводненный угольный пропласток был расположен немного выше – он вышел бы за пределы области фильтрации, что позволило бы полностью предотвратить водоприток в выработку.

Анкерная крепь существенно изменяет напряженно-деформированное состояние вмещающих пород. Применение анкерного крепления сдерживает развитие процесса трещинообразования в зоне влияния выработки. В этом случае в кровле образуется породно-анкерное перекрытие, в котором максимально сохранена монолитность нетронутого массива (Рис. 3). Размеры области фильтрации значительно сокращаются, проницаемость внутри нее снижается, что приводит к уменьшению интенсивности фильтрационного движения жидкости в нарушенных породах и предупреждению или снижению водопритока в горные выработки с анкерной крепью.

Сравнивая направления движения фильтрационных потоков на Рисунках 2 и 3, видим, что интенсивная фильтрация воды в выработку с рамной крепью происходит уже на 5-й временной итерации (Рис. 2б), а в выработку с анкерной крепью – только на 30-й итерации (Рис. 3г).

На Рисунках 4 и 5 показано распределение значений давления воды, p , МПа, в исследуемой области, вокруг выработок соответственно с рамной и анкерной крепью, на различных временных итерациях.

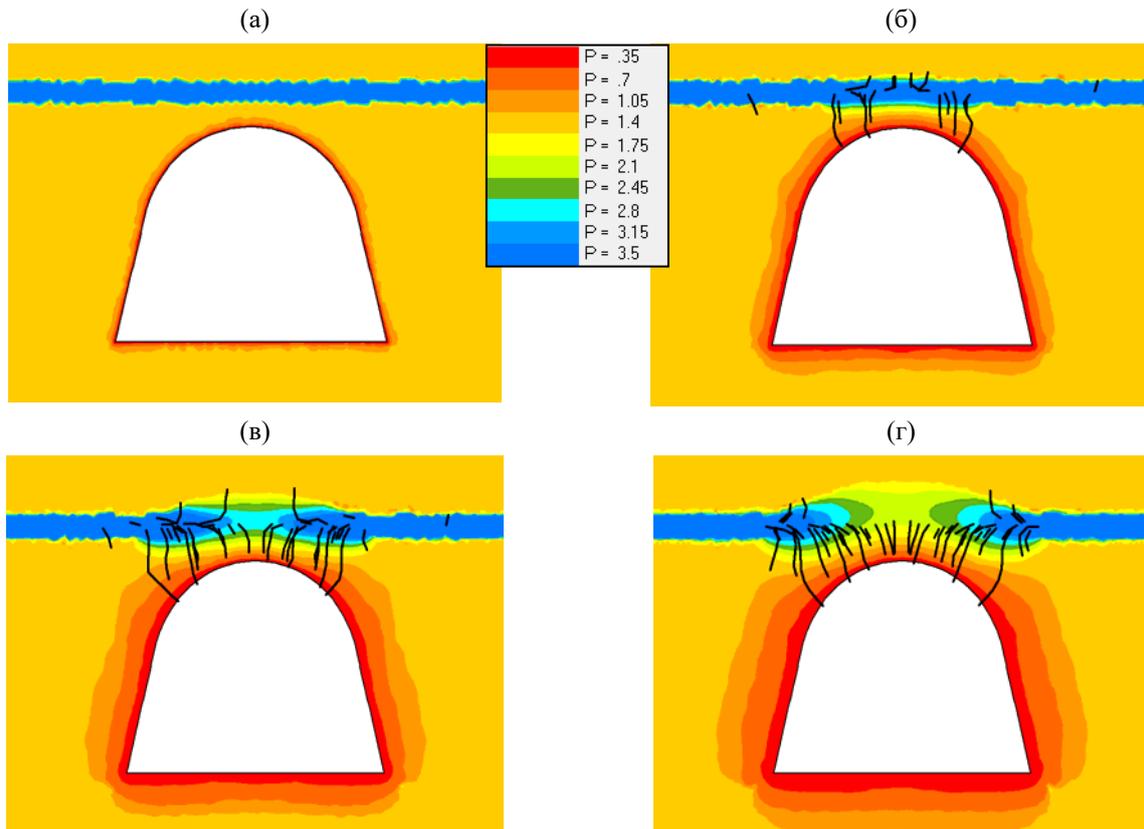


Рисунок 4. Распределение значений давления воды и направления движения фильтрационных потоков, выработка с рамной крепью: (а) $i = 1$; (б) $i = 5$; (в) $i = 15$; (г) $i = 30$

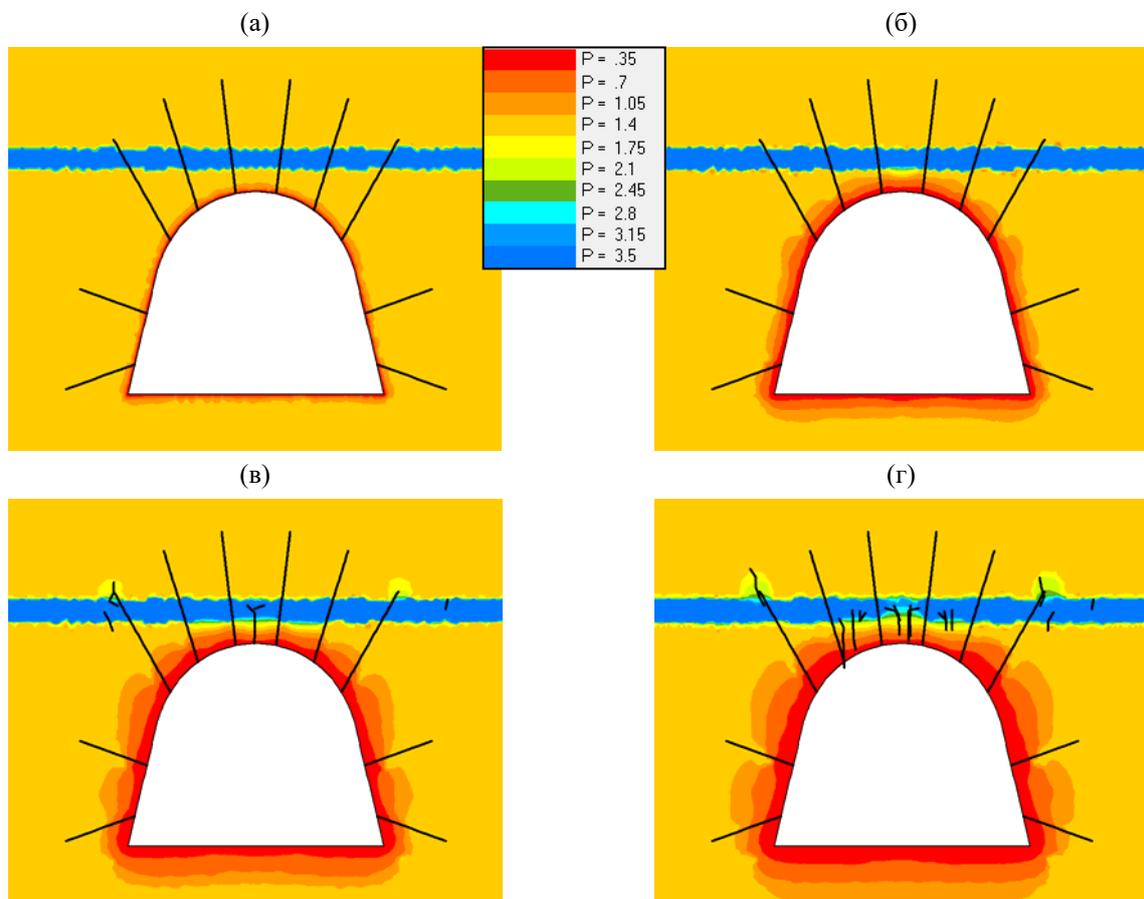


Рисунок 5. Распределение значений давления воды и направления движения фильтрационных потоков, выработка с анкерной крепью: (а) $i = 1$; (б) $i = 5$; (в) $i = 15$; (г) $i = 30$

Давление воды в подрабатываемом обводненном пропластке начинает падать, когда область фильтрации достигает его нижней границы (Рис. 4б – г). Это говорит о том, что начался процесс фильтрации – вода перемещается из областей с более высоким давлением в область, где давление минимально – в выработку. В кровле выработки с рамной крепью активно происходит процесс фильтрации воды.

В результате сокращения области фильтрации и существенного снижения значений коэффициентов проницаемости приконтурных пород при использовании анкерной крепи давление воды в подрабатываемом пропластке практически не изменяется с течением времени (Рис. 5а – г). Процесс фильтрации

носит слабо выраженный характер, водоприток в выработку будет незначительным.

Рассмотрим, как изменяются скорости фильтрации при различных способах крепления выработки. Для этого из массива расчетных данных выберем значения модулей скорости фильтрации в кровле выработки вдоль вертикальной прямой, проходящей через ее центр. Результаты расчетов приведены на Рисунке 6. Видно, что при анкерном креплении максимальные значения скорости фильтрации воды в кровле выработки снижаются на 30%; глубина области фильтрации, которая в выработке с рамной крепью достигала 1.5 м, уменьшается до 1.0 м, также на 30%.

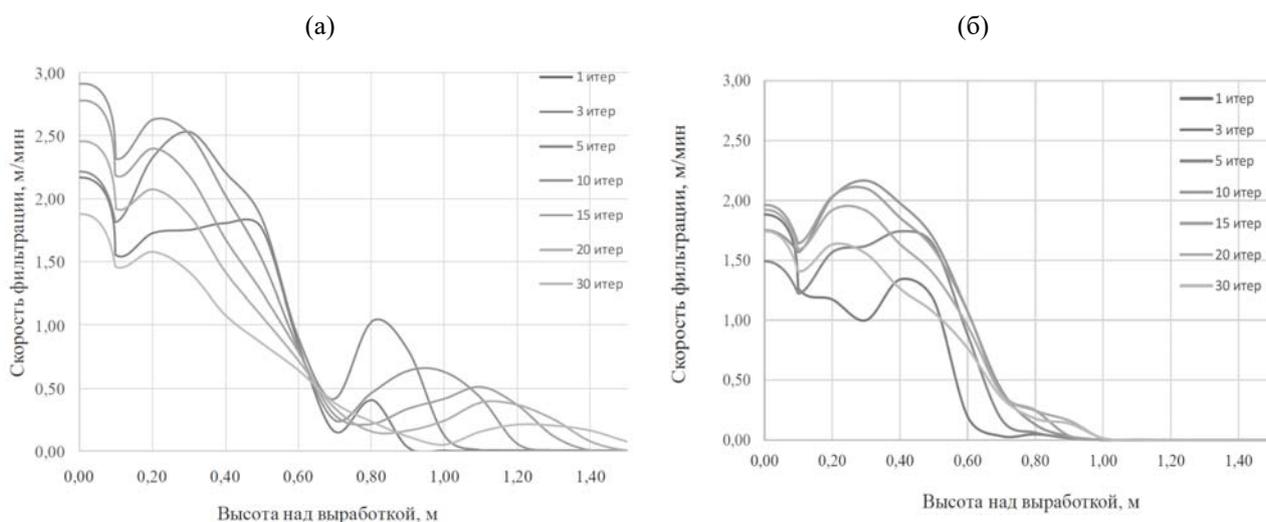


Рисунок 6. Изменение скорости фильтрации воды во времени: (а) рамная крепь; (б) анкерное крепление

3. ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель фильтрации воды в деформируемом массиве горных пород, которая отражена в “Способе исследования состояния обводненного горного массива в окрестности горной выработки” (патент UA 114572).

В результате решения задачи о подработке водоносного угольного пропластка получены значения напряжений и деформаций, зоны неупругих деформаций, значения коэффициентов проницаемости, давления воды, скорости ее фильтрации и расходов в каждой точке исследуемой области.

Показано, что применение анкерной крепи позволяет предотвратить развитие процесса трещинообразования в зоне влияния выработки. В этом случае в кровле максимально сохраняется монолитность нетронутого массива. Значительное сокращение размеров области фильтрации и снижение проницаемости внутри нее приводит к снижению интенсивности фильтрационного движения жидкости и предупреждению или снижению водопритока в горные выработки с анкерной крепью.

На основании полученных результатов разработан “Способ снижения водопритока в горную выработку с применением анкерного крепления” (патент UA 111059). Действенность данного способа была доказана на угольных шахтах Западного Донбасса.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Представленная работа выполнена в рамках отраслевой программы “Анкер” широкомасштабного внедрения анкерной крепи на угольных шахтах Украины. Авторы выражают искреннюю благодарность руководству и инженерно-техническому персоналу шахтоуправлений “Днепровское” и “Першотравенское” ЧАО “ДТЭК Павлоградуголь” за помощь при организации и проведении шахтных экспериментов.

REFERENCES

- Abramov, F.A., & Shevelev, G.A. (1972). *Mine Aerogas dynamics*. Moskva: Nedra.
- Alikin, V.N., Litvin, I.E., Scherbakov, S.M., & Borodavkin, V.P. (1992). *The Finite Element Method in the Problems of Gas-Petroleum Field Mechanics*. Moskva: Nedra.
- Geological dictionary*. (1978). Moskva: Nedra.
- Ivanov, G.V., Volchkov, Yu.M., Bogulskiy, I.O., Anisimov, S.A., & Kurguzov, V.D. (2002). *Numerical Solution of Dynamical Problems of Elastoplastic Deformation of Solids*. Novosibirsk: Siberian University Publishing House.
- Krukovska, V.V., Krukovskiy, O.P., & Vinogradov, Yu.O. (2015). Study Water Inflow in Mines with Anchors. *Heotekhnichna Mekhanika*, (120), 182-193.
- Krukovskiy, O.P. (2012). Modeling of the Technological Cycle of Installation of Roof Bolting during the Change of Speed of Excavation of Mine Working. *System Technology*, (3), 67-73.
- Masket, M. (2004). *Flow of Homogeneous Fluids in a Porous Medium*. Moskva-Izhevsk: IKI.

Vinogradov, V.V. (1989). *Geomechanics of the Massif State Control near the Mine Workings*. Kyiv: Naukova dumka.

Zienkiewicz, O.C., & Taylor, R.L. (2000). *The Finite Element Method*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Разработка математической модели связанных процессов деформирования углепородного массива и фильтрации воды в нарушенной области для исследования изменения величины водопритока в горную выработку в зависимости от способа ее крепления.

Методика. Для выполнения исследований применялись методы механики твердого тела, механики жидкости и газа, численное моделирование с применением метода конечных элементов.

Результаты. Разработана математическая модель фильтрации воды в деформируемом массиве горных пород. Показано, что применение анкерной крепи позволяет предотвратить развитие процесса трещинообразования в зоне влияния выработки. В этом случае в кровле максимально сохраняется монолитность нетронутого массива. Значительное сокращение размеров области фильтрации и снижение проницаемости внутри нее приводит к снижению интенсивности фильтрационного движения жидкости и предупреждению или снижению водопритока в горные выработки с анкерной крепью.

Научная новизна. Впервые анкерная крепь рассмотрена как технологический способ снижения водопритока в горную выработку. На основании полученных результатов разработан “Способ снижения водопритока в горную выработку с применением анкерного крепления”. Действенность данного способа была доказана на угольных шахтах Западного Донбасса.

Практическая значимость. Приведенными расчетами показано, что анкерная крепь может одновременно выполнять две функции: обеспечения устойчивости выработки и ее гидроизоляции, что существенно снижает расходы на поддержание выработки.

Ключевые слова: деформирование углепородного массива, проницаемость, фильтрация воды, численное моделирование

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Розробка математичної моделі зв'язаних процесів деформування вуглепородного масиву та фільтрації води в порушеній області для дослідження зміни величини водопритоку в гірничу виробку в залежності від способу її кріплення.

Методика. Для виконання досліджень застосовувалися методи механіки твердого тіла, механіки рідини і газу, чисельне моделювання із застосуванням методу скінченних елементів.

Результати. Розроблено математичну модель фільтрації води в масиві гірських порід, який деформується. Показано, що застосування анкерного кріплення дозволяє запобігти розвитку процесу утворення тріщин у зоні впливу виробки. У цьому випадку в покрівлі максимально зберігається монолітність непорушеного масиву. Значне скорочення розмірів області фільтрації й зниження проникності всередині неї призводить до зниження інтенсивності фільтраційного руху рідини і попередження або зниження водопритоку в гірничу виробку з анкерним кріпленням.

Наукова новизна. Вперше анкерне кріплення розглянуто як технологічний спосіб зниження водопритоку в гірничу виробку. На підставі отриманих результатів розроблено “Спосіб зниження водопритоку в гірничу виробку із застосуванням анкерного кріплення”. Дієвість даного способу було доведено на вугільних шахтах Західного Донбасу.

Практична значимість. Наведеними розрахунками показано, що анкерне кріплення може одночасно виконувати дві функції: забезпечення стійкості виробки та її гідроізоляції, що істотно знижує витрати на підтримання виробки.

Ключові слова: деформування вуглепородного масиву, проникність, фільтрація води, чисельне моделювання

ARTICLE INFO

Received: 18 February 2017

Accepted: 5 May 2017

Available online: 30 June 2017

ABOUT AUTHORS

Oleksandr Krukovskiy, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of the Institute, Institute of Geotechnical Mechanics named after M.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Simferopolska St, 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: igtm@ukr.net

Viktoriia Krukovska, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher of the Department of Dynamic Phenomena Management of Rock Pressure, Institute of Geotechnical Mechanics named after M.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Simferopolska St, 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: igtm@ukr.net

Yurii Vynohradov, Junior Researcher of the Department for Physics of Sorption Processes, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Simferopolska St, 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: my_pochta_1@mail.ua