

6. Чеботарев П.Н. Установление корреляционных взаимосвязей вязкости разрушения угольного массива с показателями его прочности. Известия ТулГУ. Технические науки. Выпуск 9/2012. – С. 88-92.

7. Масленников Е.В. Обоснование параметров прогноза выбросоопасности в угольных шахтах на основе анализа акустического сигнала. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.15.11. – Днепропетровск, 2001. – 140 с.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ ПРИ ПОДРАБОТКЕ ОБВОДНЕННЫХ ПОРОД

А.Н. Молчанов, Ю.А. Виноградов, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины, Украина

Разработана математическая модель фильтрации воды в деформируемом массиве горных пород. Впервые анкерная крепь рассмотрена как технологический способ снижения водопритока в горную выработку. Приведенными расчетами показано, что анкерная крепь может одновременно выполнять две функции: обеспечения устойчивости выработки и ее гидроизоляции, что существенно снижает расходы на поддержание выработки. На основании полученных результатов разработан «Способ снижения водопритока в горную выработку с применением анкерного крепления».

Трудно переоценить значение Западного Донбасса для современной Украины. Особенно сейчас, когда количество угольных предприятий значительно сократилось. Сегодня на шахтах Западного Донбасса добывается половина угля всей страны. Промышленные запасы Западодонбасского угольного месторождения составляют 699,2 млн. тонн, что обеспечивает добычу угля на существующем уровне в течение 56 лет.

В строении продуктивной толщи района имеется большое количество водоносных горизонтов, которые в той или иной степени угрожают безопасности и повышают сложность проведения горных выработок. Величина проницаемости нарушенных вмещающих пород возрастает в зоне подработки на два-три порядка. В результате приконтурные породы размокают и теряют прочностные свойства. Большая часть осложнений и аварий в горных выработках связана с водопроявлениями при подработке водоносных пород. Поэтому для Западного Донбасса актуальны задачи прогноза водопритоков и уменьшения их пагубного влияния на состояние горных выработок.

Опыт ведения горных работ в слоистом породном массиве с обводненными слоями показывает, что технология этих работ может влиять на протекание фильтрационных процессов в нарушенной зоне горного массива. Способы проходки выработки, величина заходки, скорость подвигания забоя влияют на распределение напряжений вокруг выработки, на конфигурацию области фильтрации, проницаемость внутри нее и, следовательно, на формирование и направление движения фильтрационных потоков в нарушенной области.

Применение анкерного крепления горных выработок позволяет сохранить вмещающие породы в первоначальном, монолитном состоянии. Предотвращение развития трещинообразования в приконтурной зоне должно значительно ограничить интенсивность фильтрационного движения жидкости, предупредить или снизить величину водопритока в выработку с анкерной крепью [1]. Так как анкерная крепь как средство снижения водопритока в горные выработки ранее не рассматривалась, необходимо выполнить исследование протекания процесса фильтрации воды в выработку в зависимости от способа ее крепления и различных гидрогеологических условий.

В связи с этим целью работы является установление закономерностей протекания процесса фильтрации воды из подрабатываемого обводненного пропластка в горную выработку в зависимости от способа ее крепления и различных гидрогеологических условий.

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 [2]. Источником давления, которому подвержены жидкости в трещинно-поровом пространстве, является обжатие горных пород после первоначального осадкообразования под действием силы тяжести [3].

Уравнения неразрывности фильтрационного потока можно представить в виде [4, 5]:

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

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:

$$\begin{aligned} p|_{t=0} &= p_0(y), \quad p_0 = \rho g(H - y); \\ p|_{\Omega_1} &= p_1; \\ p|_{\Omega_2} &= p_2. \end{aligned} \quad (2)$$

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 [6]. Известно, что проницаемость горных пород зависит также от напряжено-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 уравнением [7, 8]:

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

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 горных 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: $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$, характеризующий разнокомпонентность поля напряжений, и $P^* = \sigma_3 / \gamma H$, характеризующий разгрузку массива от горного давления.

Для расчета проницаемости в горном массиве вокруг выработки с учетом его напряженного состояния будем считать, что [9]:

- 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 [10]. 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 [2, 4]. В результате решения получим значения напряжений и деформаций, зоны неупругих деформаций, значения давления воды, скоростей ее фильтрации и расходов в каждой точке исследуемой области [11].

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 табл. 1. Давление воды в угольном пропластке – 3,5 МПа.

Табл. 1. Характеристика углей и вмещающих пород

Описание пород	Удельный вес, т/м ³	Предел прочности, $\sigma_{сж}$, МПа		Удельная трещиноватость, тр/пм
		в естествен. состоянии	при влагонасыщении	
Песчаник	2,6	26,5	11,7	8-10
Аргиллит	2,3	23,6	2,4	6-8
Уголь обводненный	1,26	32,4	27,4	15-20

Стратиграфическая колонка, конечно-элементная сетка и схема анкерного крепления показаны на рис. 1.

Исследуем, как влияет значение пластового давления воды в подрабатываемом обводненном угольном пропластке на величину водопритока в выработку с рамной и анкерной крепью. Для этого выполним серию расчетов при $p_1 = 0,7$ МПа; $p_1 = 1,5$ МПа; $p_1 = 2,3$ МПа; $p_1 = 3,1$ МПа; $p_1 = 3,9$ МПа; $p_1 = 4,7$ МПа. С использованием приведенных выше соотношений получим распределения значений коэффициентов проницаемости породного массива, рис. 2, и давления воды, рис. 3, вокруг выработок с рамной и анкерной крепью на различных временных итерациях i . На рисунках показаны поля фильтрационных параметров при $i = 30$.

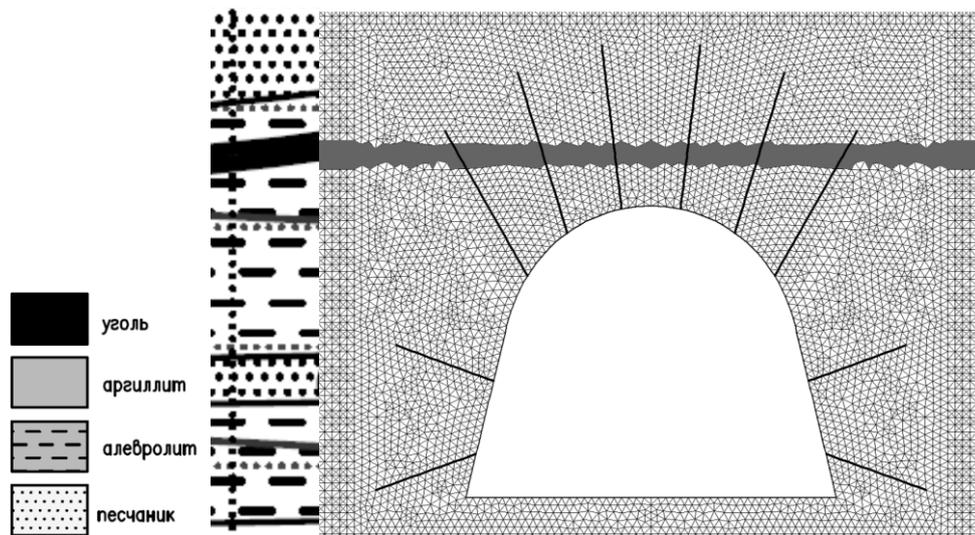
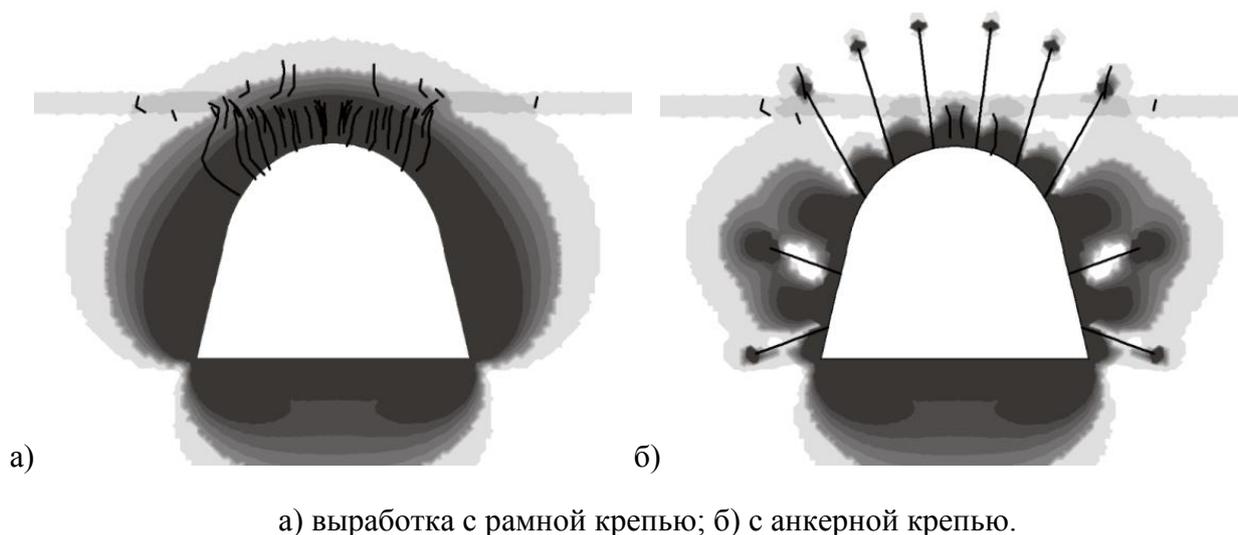


Рис. 1. Центральный фрагмент конечно-элементной сетки



а) выработка с рамной крепью; б) с анкерной крепью.

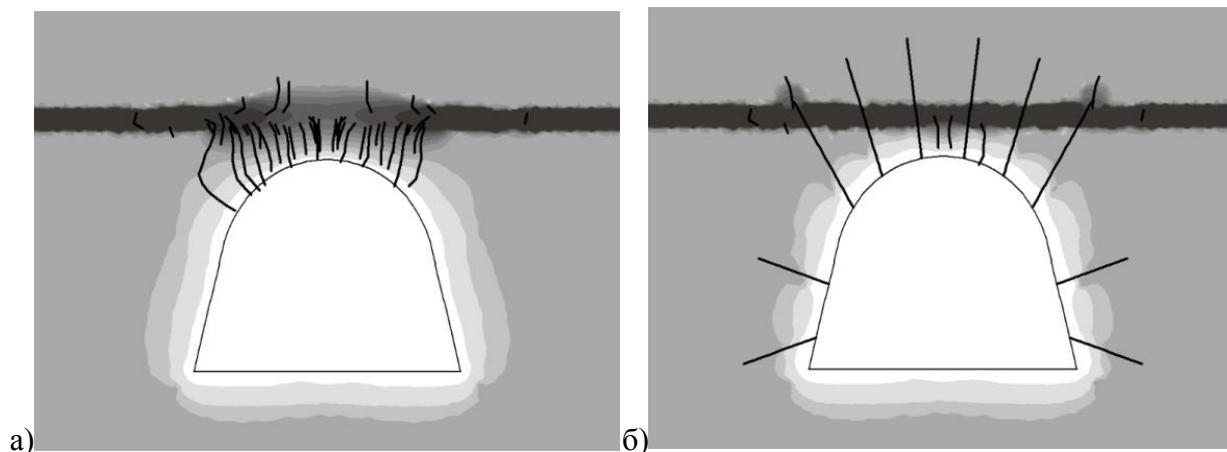
Рис. 2. Проницаемость и направления движения фильтрационных потоков при пластовом давлении 3,1 МПа

Можно видеть, что вокруг выработки с рамной крепью образуется водопроницаемая область, рис. 2 а. Обводненный угольный пропласток расположен в зоне интенсивной трещиноватости. При $i = 30$, рис. 2 а, длина области пересечения обводненного пропластка и повышенной проницаемости (темно-серый цвет) равна ширине выработки. Фильтрация воды внутрь выработки происходит именно из этой зоны.

На рис. 2 б видно, как изменяются контуры области фильтрации, если в кровле и боках выработки установлены анкера. В этом случае в кровле образуется породно-анкерное перекрытие, в котором максимально сохранена монолитность нетронутого массива, проницаемая зона в кровле выработки не превышает 0,3-0,5 м вглубь массива. Размеры области фильтрации значительно сокращаются, проницаемость внутри нее снижается, что приводит к уменьшению интенсивности фильтрационного движения жидкости в нарушенных породах. Область пересечения обводненного пропластка и повышенной проницаемости (темно-серый цвет) очень мала. Если бы обводненный пропласток был расположен немного выше – он вышел бы за пределы области фильтрации, что позволило бы полностью предотвратить водоприток в выработку.

Сравнивая движение фильтрационных потоков на рис. 2 а и 2 б, 3 а и 3 б, видим, что интенсивность фильтрации воды в выработку с рамной крепью намного превышает

фильтрацию в выработку с анкерной крепью. В кровле выработки с рамной крепью активно происходит процесс фильтрации воды. Давление воды в подрабатываемом обводненном пропластке снижается, рис. 3 а, – вода перемещается из областей с более высоким давлением в область, где давление минимально – в выработку.



а) выработка с рамной крепью; б) с анкерной крепью.

Рис 3. Давление воды и направления движения фильтрационных потоков при пластовом давлении 3,1 МПа

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. 3 б. Процесс фильтрации носит слабо выраженный характер, водоприток в выработку будет незначительным. Об этом свидетельствует и снижение скоростей фильтрации воды в кровле выработки с анкерной крепью, рис. 4.

Построим графики изменяется величины водопритока в выработку в зависимости от давления воды в подрабатываемом пропластке при рамном и анкерном креплении, рис. 5. Видно, что с увеличением давления воды в подрабатываемых породах, увеличивается и водоприток в выработку, однако использование анкерной крепи снижает его в 1,7-2,1 раза.

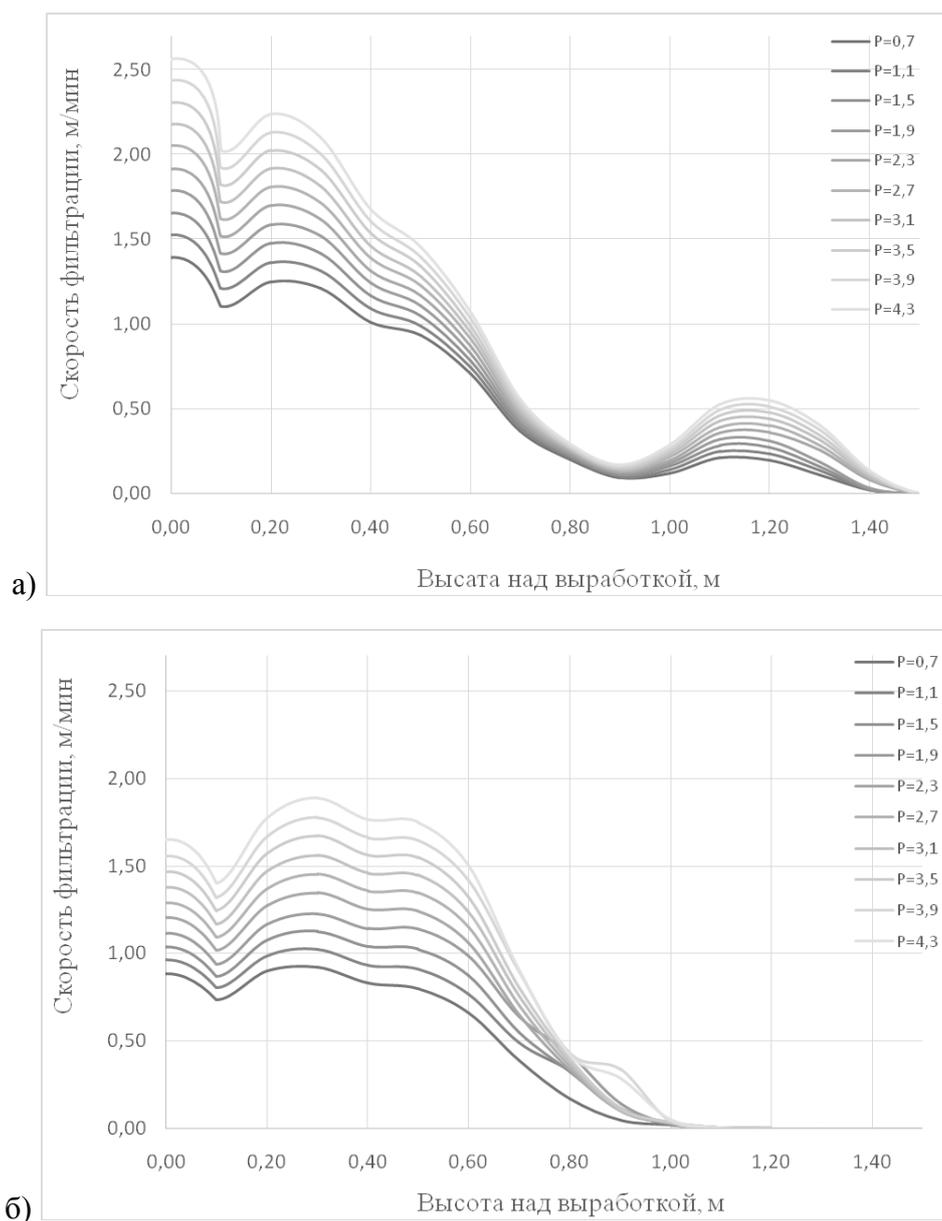
При заданных физико-механических свойствах горных пород, мощности и высоте расположения обводненного слоя водоприток q в выработку можно аппроксимировать зависимостью от величины пластового давления воды (с достоверностью аппроксимации $R^2=0,99$):

$$q_{PK} = 0,72p_1 + 1,90, \text{ при рамном креплении.}$$

$$q_{AK} = 0,27p_1 + 1,19, \text{ при анкерном креплении.}$$

Водоприток из зоны пересечения обводненного породного слоя и нарушенной области вокруг горной выработки линейно возрастает с увеличением пластового давления воды, причем использование анкерной крепи снижает водоприток в 1,7-2,1 раза.

Исследуем закономерности притока воды в выработку в зависимости от высоты h расположения водоносного пропластка над выработкой. Выполним расчеты для случаев, когда $h = 0,15$ м; $h = 0,55$ м; $h = 0,95$ м; $h = 1,35$ м; $h = 1,75$ м; $h = 2,15$ м. Распределения значений проницаемости углепородного массива, давления воды и направления движения фильтрационных потоков в выработку с рамной и с анкерной крепью при $h = 0,55$ м показаны на рис. 2 и 3. Проницаемость и направления движения фильтрационных потоков при высоте расположения обводненного пропластка над выработкой $h = 1,35$ м – на рис. 6.



а) при рамном креплении; б) при анкерном креплении.

Рис. 4. Изменение скорости фильтрации воды в зависимости от высоты расположения подрабатываемого пропластка

С увеличением высоты водонасыщенного пропластка интенсивность движения фильтрационных потоков в выработку уменьшается. Приток воды в выработку с рамной крепью прекращается при $h = 2,15$ м, в выработку с анкерной крепью – при $h = 0,95$ м. Видно, что анкерная крепь значительно снижает водопиток в выработку при любых значениях высоты h расположения водоносного пропластка над выработкой.

Давление воды в подрабатываемом угольном пропластке при рамном креплении снижается с 3,5 МПа до 0,75 МПа для $h = 0,15$ м, рис. 7 а. При увеличении значения высоты h до 1,75 м – с 3,5 МПа до 3,2 МПа. Понижение давления обусловлено перемещением воды из областей с более высоким давлением (обводненный пропласток) в выработку, где давление минимально.

При анкерном креплении давление воды в пропластке не изменяется уже при $h = 0,95$ м, рис. 7 б, что говорит о прекращении процесса фильтрации.

Построим графики изменяется величины водопитока в выработку в зависимости от высоты расположения подрабатываемого пропластка над выработкой с рамной и анкерной крепью, рис. 8.

Из графика видим, что с увеличением высоты водоносного пропластка над выработкой как

в случае с анкерным, так и с рамным креплением водоприток в выработку снижается. При анкерном креплении величина водопритока в 2 раза меньше, когда обводненный пропласток находится в пределах области фильтрации.

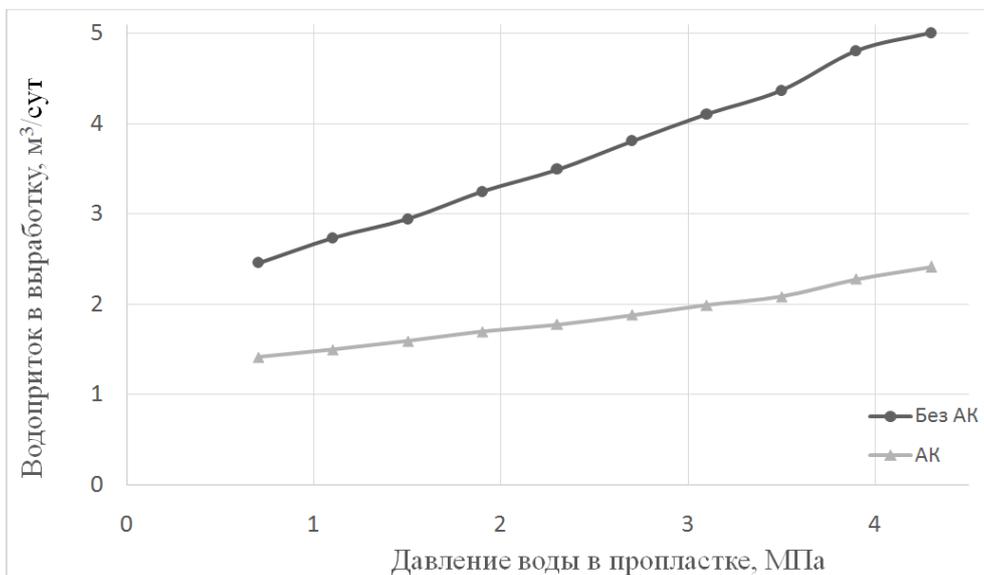


Рис. 5. Изменение величины водопритока в выработку в зависимости от давления воды в подрабатываемом пропластке при рамном и анкерном креплении

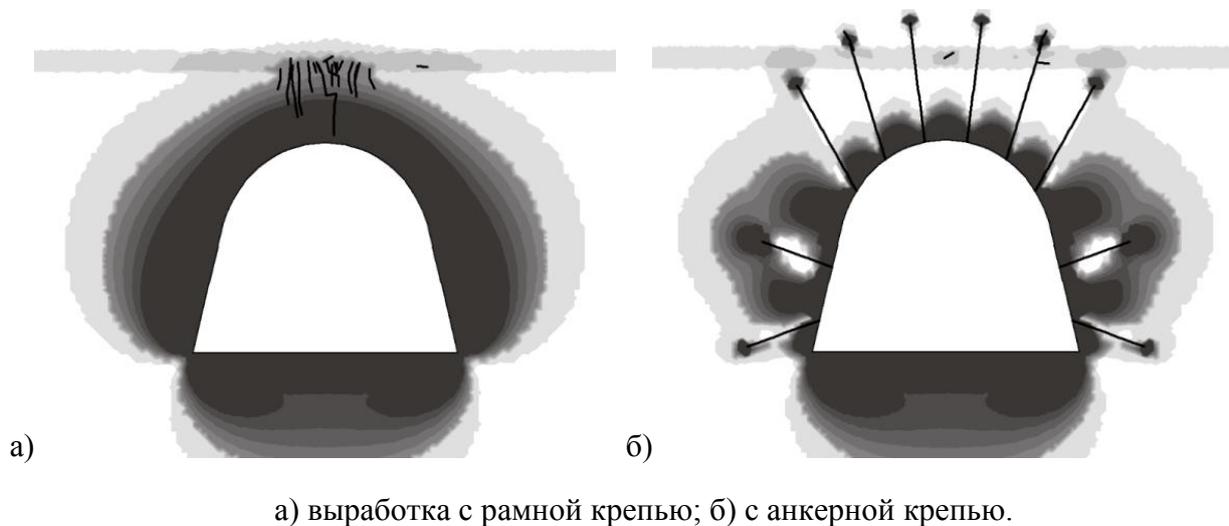


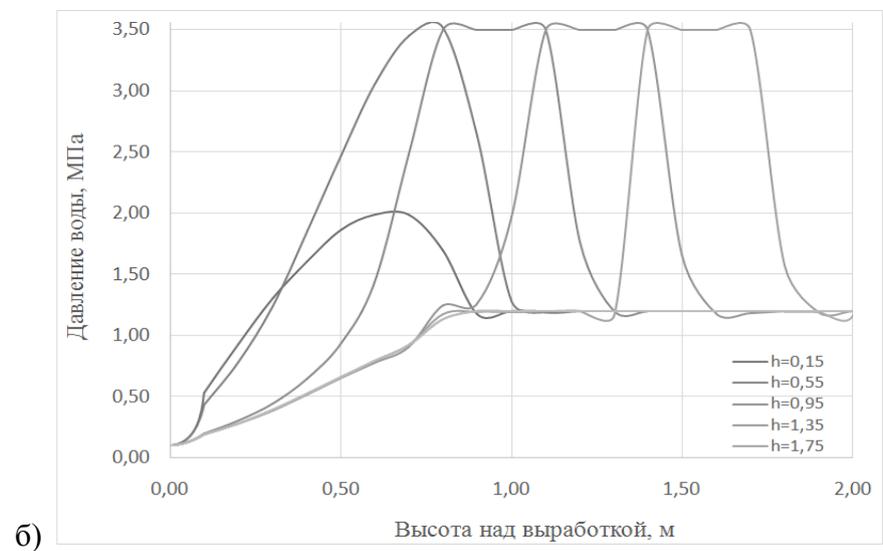
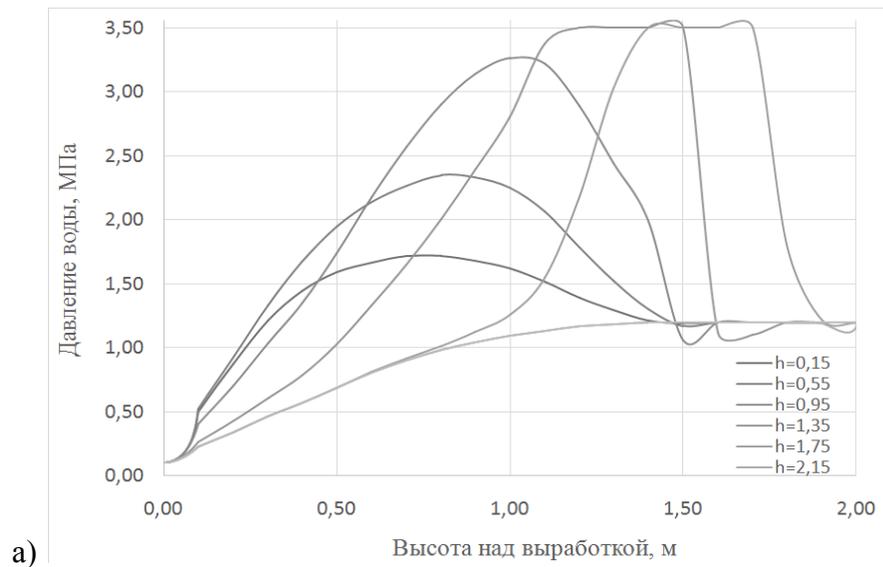
Рис. 6. Проницаемость и направления фильтрационных потоков, $h = 1,35$ м

При заданных физико-механических свойствах горных пород, мощности обводненного слоя и пластовом давлении воды водоприток q в выработку можно аппроксимировать параболической зависимостью от высоты h расположения подрабатываемого пропластка (с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,97$ и $R^2 = 0,81$ соответственно):

$$q_{PK} = 0,35h^2 - 2,40h + 5,46, \text{ при рамном креплении.}$$

$$q_{AK} = 0,23h^2 - 1,27h + 3,11, \text{ при анкерном креплении.}$$

Водоприток из зоны пересечения обводненного породного слоя и нарушенной области вокруг горной выработки снижается с увеличением высоты водоносного пропластка над выработкой, причем, когда пропласток находится в зоне $h < h_{обл.фильтр.}$, применение анкерной крепи уменьшает водоприток в 2 раза.



а) при рамном креплении; б) при анкерном креплении.

Рис. 7. Изменение давления воды в зависимости от высоты расположения подрабатываемого пропластка

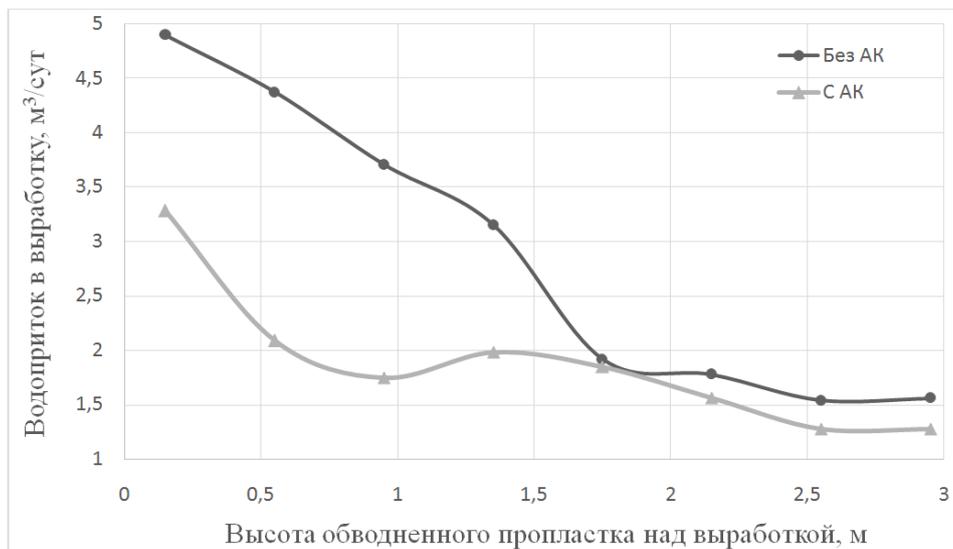


Рис. 8. Изменение величины водопритока в выработку в зависимости от высоты расположения подрабатываемого пропластка при рамном и анкерном креплении

Выводы. В результате решения задачи о подработке водоносного угольного пропластка получены значения напряжений и деформаций, зоны неупругих деформаций, значения коэффициентов проницаемости, давления воды, скоростей ее фильтрации и расходов в каждой точке исследуемой области для различных значений пластового давления воды и высоты расположения водоносного слоя.

Показано, что водоприток из зоны пересечения обводненного породного слоя и нарушенной области вокруг горной выработки линейно возрастает с увеличением пластового давления воды, причем использование анкерной крепи снижает водоприток в 1,7-2,1 раза. Показано также, что водоприток из зоны пересечения обводненного породного слоя и нарушенной области вокруг горной выработки снижается с увеличением высоты водоносного пропластка над выработкой, причем, когда пропласток находится в зоне $h < h_{обл.фильтр.}$, применение анкерной крепи уменьшает водоприток в 2 раза. Применение анкерной крепи 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» [12].

Список литературы

1. Виноградов Ю.А. Исследование водопритока в горную выработку в зависимости от способа ее крепления // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Науково-виробничий збірник: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1(15). – С. 89-95.
2. Метод конечных элементов в задачах газонефтепромысловых механики / В.Н. Аликин, И.Е. Литвин, С.М. Щербаков, В.П. Бородавкин. – М.: Недра, 1992. – 228 с.
3. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. – М.-Ижевск: ИКИ, 2004. – 640 с.
4. Zienkiewicz, O.C. The finite element method / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – Butterworth-Heinemann, 2000. – 690 p.
5. Абрамов Ф.А. Рудничная аэрогазодинамика / Ф.А. Абрамов, Г.А. Шевелев. – М.: Недра, 1972. – 274 с.
6. Геологический словарь: в 2-х томах. – М.: Недра, 1978.
7. Численное решение динамических задач упругопластического деформирования твердых тел / Г.В. Иванов, Ю.М. Волчков, И.О. Богульский, С.А. Анисимов, В.Д. Кургузов. – Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2002. – 352 с.
8. Круковский А.П. Моделирование технологического цикла установки анкерной крепи при изменении скорости проведения горной выработки / А.П. Круковский // Системні технології: Регіональний міжвузівський зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3. – С. 67-73.
9. Круковская В.В. Исследование водопритока в горные выработки с анкерной крепью / В.В. Круковская, А.П. Круковский, Ю.А. Виноградов / Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – № 120. – С. 182-193.
10. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
11. Спосіб дослідження стану обводненого гірського масиву навколо гірничої виробки / В.В. Круковская, А.П. Круковский, Ю.А. Виноградов // Патент на корисну модель по заявці у 2016 09 867 МПК E21F 16/02, E21D 11/00; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України. – № 114572; 10.03.2017. – Бюл. № 5/2017.
12. Спосіб зниження водопритоку у гірничу виробку із застосуванням анкерного кріплення / В.В. Круковская, А.П. Круковский, Ю.А. Виноградов // Патент на корисну модель по заявці у 2016 05 305 МПК E21D 11/38; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України. – № 111059; 25.10.2016. – Бюл. № 20.