

УДК 622.016:831

Д.В. Рудаков, д-р техн. наук, доц.,  
Е.С. ИвановаГосударственное высшее учебное заведение  
“Национальный горный университет”, г. Днепропетровск,  
Украина, e-mail: dmi3rud@mail.ru

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОНИЦАЕМОСТИ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД ВОКРУГ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

D.V. Rudakov, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
Ye.S. IvanovaState Higher Educational Institution “National Mining University”,  
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: dmi3rud@mail.ru

### ESTIMATION OF FRACTURED ROCK PERMEABILITY AROUND EXCAVATIONS FROM THE VIEWPOINT OF ROCK MECHANICS

**Цель.** Оценка изменений проницаемости трещиноватых пород вследствие возмущений напряженно-деформированного состояния вмещающих пород, обусловленных появлением подземной выработки.

Объект исследований представлен локальной областью породного массива вокруг горизонтальных выработок на глубинах до 900 м, характерных для рудных месторождений Центральной Украины.

**Методика.** В статье предложена методика, основанная на численном моделировании напряженно-деформированного состояния массива и расчете коэффициента фильтрации по параметрам трещиноватости, что позволяет оценить проницаемость трещиноватых пород в зоне расположения подземных выработок. Верификация модели выполнена для горно-геологических условий Южно-Белозерского месторождения.

**Результаты.** Изучен характер изменения зоны активной трещиноватости при различных глубинах, свойствах пород и параметрах трещин: длине, величине раскрытия, расстоянии между трещинами, угле наклона. Практический интерес представляет изменение проницаемости как в пределах шахтного поля, так и вокруг отдельных выработок. Установлены закономерности изменения коэффициента фильтрации в зависимости от характеристик трещиноватых пород. Установлены зоны изменения коэффициента фильтрации в 2–3 раза относительно значений для ненарушенных пород вокруг выработки при угле падения трещин от 0° до 90°, зависящие от расстояния между трещинами. Наибольшие изменения характерны для угла падения 45°, причем протяженность зон достигает 3–5 радиусов выработки.

**Научная новизна.** На основании численного моделирования напряженно-деформированного состояния пород выполнен анализ зоны локальных изменений проницаемости трещиноватых пород вокруг подземной выработки круглого сечения при различном угле падения трещин.

**Практическая значимость.** Уточненные значения коэффициента фильтрации в зоне влияния подземных выработок позволяют выполнять обоснованные прогнозы гидродинамического режима в нарушенном массиве пород при затоплении шахт.

**Ключевые слова:** породный массив, проницаемость, подземная выработка, напряженно-деформированное состояние, коэффициент фильтрации, система трещин, численное моделирование

**Введение.** Теоретическая основа гидрогеомеханических процессов в нарушенном трещиноватом массиве сформировалась в результате многочисленных исследований на протяжении многих десятилетий. К ним, в частности, следует отнести теорию А. Гриффитса о зарождении и развитии трещин, работы [1, 2] в области механики деформируемых многофазных сред, фильтрации в массиве трещиноватых пород. При этом В.Н. Николаевский рассмотрел эффекты изменения пустотности при сдвиге и насыщении пор и трещин жидкостью. Кроме того, Руппенейтом К.В. был предложен метод определения модулей деформации ослабленного трещинами массива по известным значениям модуля деформации ненарушенной горной породы, ширины раскрытия трещин, площади скальных контактов в трещинах и расстояниям между ними.

Влияние геомеханических нарушений на фильтрационную проницаемость пород, с учетом систем

водопроявляющих трещин над выработками, исследовалось в [3]. В работе [4] была предложена и протестирована модель фильтрации в трещиноватых нарушенных породах, причем параметры трещиноватости задавались случайными полями.

К настоящему времени накоплен большой объем данных по динамике водопритоков в подземные выработки, однако эти результаты относятся, преимущественно, к фильтрации в масштабе шахты или группы шахт. Это не позволяет достоверно определять фильтрационные параметры в масштабе отдельного блока сетки. В результате их приходится уточнять в ходе решения обратных задач, что подменяет реальное физическое содержание параметра проводимости в блоке сетки. Кроме того, для некоторых выработок специального назначения, используемых, например, для долговременного хранения отработанного ядерного топлива, необходим тщательный анализ даже локальных изменений проницаемости и возможных водопритоков. Подобные оценки оказы-

ваются важными и для выработок, формируемых при строительстве и эксплуатации метрополитена.

Проницаемость трещиноватого массива определяется азимутом и углом падения трещин, их длиной, формой и раскрытием, а также их заполнителем, например, песком или обломочным материалом. Раскрытие трещин существенно зависит от напряжений и деформаций пород как естественных, так появившихся в результате ведения горных работ. Несмотря на очевидность такой причинно-следственной связи, пространственные изменения проницаемости, обусловленные изменениями напряженно-деформированного состояния вмещающих пород, пока не исследованы в должной мере количественными методами.

Фильтрация в трещиноватых породах может моделироваться как путем пространственного усреднения параметров блоков и трещин (Чернышев С.Н.), так и на основе стохастического представления трещин и соотношений гидравлического потока в щелях различного раскрытия [4]. Для обоих методов важно знать изменения раскрытия трещин, которые используются в расчетах либо непосредственно, либо через коэффициент фильтрации, вычисленный тензорным методом. При этом возможно учитывать несколько систем трещин, имеющих свои характеристики (Чернышев С.Н.).

**Методика моделирования.** Принимаются следующие допущения: 1) напряженно-деформированное состояние пород моделируется на основе предположения об их упругих деформациях; 2) фильтрационные процессы не оказывают существенного влияния на прочностные свойства пород; 3) рассматриваются крупные трещины, а влияние мелких трещин считается несущественным как с точки зрения напряженно-деформированного состояния, так и фильтрации.

Рассмотрим случай слоистой анизотропии пород, когда одна наиболее выраженная система параллельных трещин пересекает выработку круглого поперечного сечения радиусом  $R$  под определенным углом. При этом центр выработки расположен на глубине  $h$  от поверхности земли (рис. 1).

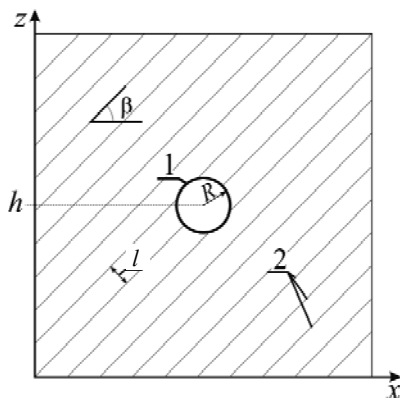


Рис. 1. Схематизация системы трещин (2) вокруг горизонтальной выработки (1):  $l$  – расстояние между трещинами;  $\beta$  – угол падения трещин

В области упругих деформаций связь между деформациями и напряжениями описывается законом Гука и выражается уравнениями

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E_n(\epsilon_1 + \nu_n \epsilon_3)/(1 - \nu_n^2); \\ \sigma_3 &= E_n(\epsilon_3 + \nu_n \epsilon_1)/(1 - \nu_n^2), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E_n = E/(1 - \nu^2)$ ,  $\nu_n = \nu/(1 - \nu)$  – „плоские“ аналогии модуля Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ ;  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_3$  – упругие деформации вдоль горизонтальной и вертикальной осей.

Предельные напряжения в области растяжения ограничиваются прочностью на растяжение  $T$  ( $T < 0$ )

$$\sigma_3 = T,$$

а в области сжатия – критерием Кулона-Мора

$$\sigma_1 = S + \sigma_3 \operatorname{ctg} \varphi. \quad (2)$$

Величина раскрытия трещин может быть выражена через коэффициент жесткости. Коэффициент нормальной жесткости  $k_n$  рассчитывается при учете свойств вмещающих пород

$$k_n = \frac{E_i E_m}{l(E_i - E_m)} = E_o / b, \quad (3)$$

где  $E_m$  – модуль упругости;  $E_i$  – коэффициент упругости ненарушенного горного массива;  $k_n$  – коэффициент нормальной жесткости;  $l$  – среднее расстояние между трещинами;  $E_o$  – модуль Юнга материала, заполняющего трещину;  $b$  – величина раскрытия трещины.

Используя предыдущую формулу, можно получить выражение для сдвиговых перемещений

$$k_i = \frac{G_i G_m}{l(G_i - G_m)} = \frac{G_o}{b}, \quad (4)$$

где  $G_m$  – модуль сдвига;  $G_i$  – исходный модуль сдвига;  $k_i$  – коэффициент сдвига;  $G_o$  – объёмный модуль упругости материала, заполняющего трещину;  $l$  – среднее расстояние между трещинами.

На основании полученных распределений напряжений, в соответствии с соотношениями для разрывов смещений [5], определяются деформации трещин относительно их первоначального раскрытия.

Коэффициент фильтрации трещиноватых пород  $K$  может рассчитываться по нескольким формулам (Чернышев С.Н., Ромм Е.С.). Согласно формуле Е.С. Ромма, получившей широкое распространение, коэффициент фильтрации пород, пронизанных  $n$  системами трещин с одинаковыми параметрами, вычисляется в виде

$$K = \frac{g}{12\nu} \sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{l_i + b_i} \{1 - S_i\} + \sum_{i=1}^n \frac{b_i K_i}{l_i + b_i} \{1 - S_i\}, \quad (5)$$

$$S_i = [\sin \beta_i (\cos \alpha_i \cos \varphi_i + \sin \alpha_i \cos \rho_i) + \cos \beta_i \cos \gamma_i]^2,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $b_i$  – раскрытие трещин в  $i$ -той системе;  $l$  – расстояние между трещинами в системе;  $\alpha_i$  – азимут падения  $i$ -той системы трещин;  $\beta_i$  – угол падения  $i$ -той системы трещин;  $\rho_i$ ,  $\varphi_i$ ,  $\gamma_i$  – углы между направлением, для которого оценивается коэффици-

ент фильтрации, и координатными осями  $x, y, z$ ;  $K_f$  – коэффициент фильтрации заполнителя трещин.

**Результаты моделирования.** Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород выполнено методом конечных элементов в программе Phase2 (Rocscience Inc.) (J. Ghaboussi). Детально рассмотрен случай одной системы трещин ( $n = 1$ ).

Для выполнения расчетов были приняты исходные данные, характерные для Южно-Белозерского месторождения. Это месторождение характеризуется высокими водопритоками в подземные выработки. При этом на больших глубинах залегают водоносные известняки и песчаники, обладающие высокой прочностью. Диапазон угла падения трещин  $\beta$  составляет  $40\text{--}75^\circ$ . Рассмотрен интервал глубин отработки от 500 до 900 м, причем расстояние между трещинами в системе изменяется от 0,5 до 1,5 м. Значения коэффициента Пуассона  $\nu$  и модуля Юнга  $E_0$  приняты равными 0,3 и 20000 МПа соответственно. Расчет производился по критерию устойчивости Кулона-Мора. Значения параметров трещин, при которых

выполнялись расчеты, сведены в табл. 1. Раскрытие трещин  $b$  в ненарушенных породах составляет 0,1 мм, значение коэффициента фильтрации – 0,12 м/сут. Результаты расчетов представлены на рис. 2–4.

Таблица 1

Варианты значений параметров трещин, использованные при моделировании

| Вариант | Угол падения трещин, $\beta$ , град. | Расстояние между трещинами, $l$ , м |
|---------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1а      | 0                                    | 0,5                                 |
| 1б      |                                      | 1,0                                 |
| 1в      |                                      | 1,5                                 |
| 2в      |                                      | 1,5                                 |
| 3а      | 45                                   | 0,5                                 |
| 3б      |                                      | 1,0                                 |
| 3в      |                                      | 1,5                                 |
| 4в      |                                      | 1,5                                 |
| 5а      | 90                                   | 0,5                                 |
| 5б      |                                      | 1,0                                 |
| 5в      |                                      | 1,5                                 |

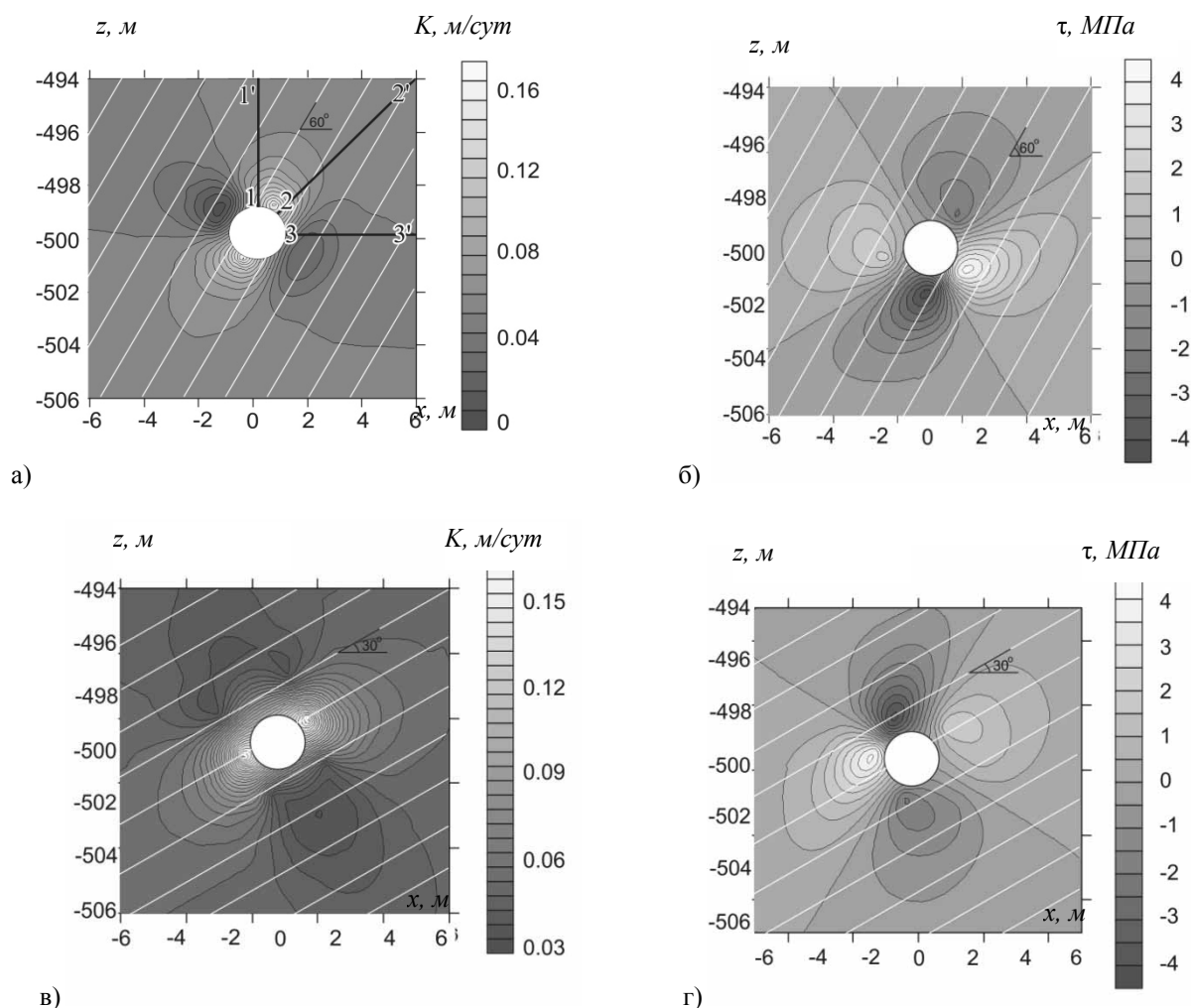


Рис. 2. Распределение коэффициента фильтрации (а, в) и сдвиговых напряжений (б и г) вокруг выработки

Результаты моделирования показывают, что зоны с наибольшим значением коэффициента фильтрации расположены непосредственно возле контура выработки по направлению падения системы трещин в

области, размер которой не превышает  $2R$ . Область сдвиговых деформаций охватывает несколько большую площадь по сравнению с зоной изменений коэффициента фильтрации. Его наибольшие изменения

прогнозируются в зонах с максимальными по модулю сдвиговыми деформациями, причем положение зон зависит также от угла падения трещин. Максимальное значение  $K$  при заданом  $\beta$  будет расположено вблизи контура выработки, в направлении, соответствующем углу падения данной системы трещин.

Существенные изменения  $K$  вокруг выработки прослеживаются на расстоянии до  $5R$  от контура выработки. Так коэффициент фильтрации на контуре выработки увеличивается от  $0,14$  м/сут при  $\beta = 45^\circ$  до  $0,18$  м/сут при  $\beta = 60^\circ$ . Наибольшие изменения  $K$  при увеличении  $l$  характерны для  $\beta = 45^\circ$  (рис. 3).

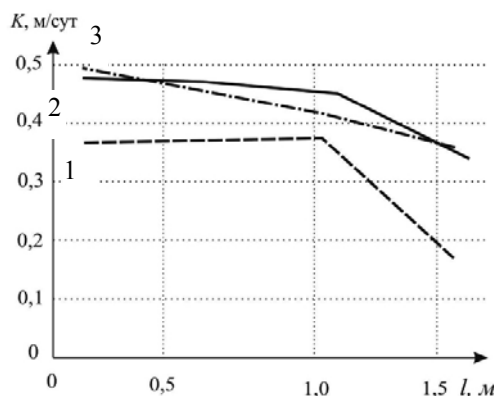


Рис. 3. Изменение коэффициента фильтрации  $K$  вдоль профилей (2–2) при различном расстоянии между трещинами  $l$  (м) и угле падения  $\beta$  на глубине  $h = 875$  м:  $\beta = 45^\circ$  (1),  $\beta = 90^\circ$  (2),  $\beta = 0^\circ$  (3)

При одинаковых условиях наименьшее значение коэффициента фильтрации соответствует углу падения  $\beta = 45^\circ$  над контуром выработки. С увеличением расстояния между трещинами с  $0,5$  м до  $1,5$  м, коэффициент фильтрации вокруг выработки уменьшается, в среднем, на  $25\%$  при  $\beta = 0^\circ$  и на  $50\%$  при  $\beta = 45^\circ$ .

С уменьшением глубины, при  $h = 500$  м, изменения  $K$ , вследствие деформаций вокруг выработки, значительно меньше и составляют  $0,03 - 0,15$  м/сут (при  $\beta = 30^\circ$ ) и  $0,04 - 0,16$  м/сут (при  $\beta = 60^\circ$ ).

С увеличением угла падения трещин от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  их раскрытие будет минимальным в направлении 3–3' и максимальным в направлении 1–1' (по сектору „1–1'–2'–3'–3“ на рис. 4).

При различном расположении системы трещин в пространстве, независимо от угла наклона трещин, их раскрытие уменьшается при удалении от выработки и на расстоянии  $7-7,5$  м приближается к  $0,1$  мм. Дополнительное раскрытие трещин вследствие изменения напряженно-деформированного состояния массива вокруг выработки составило  $0,01 - 0,06$  мм (при  $\beta = 30^\circ$ , вар. 2, в) и  $0,014-0,05$  мм (при  $\beta = 60^\circ$ , вар. 4, в). При увеличении  $l$  на  $1,0$  м, коэффициент фильтрации  $K$  уменьшается от  $0,1$  м/сут (при  $\beta = 0^\circ, 90^\circ$ ) до  $0,2$  м/сут (при  $\beta = 45^\circ$ ).

**Выводы.** Разработанная методика позволяет выполнять количественный анализ изменения проницаемости трещиноватого массива, нарушенного подземными выработками. Методика основывается на численном моделировании напряженно-деформи-

рованного состояния и последующего вычисления коэффициента фильтрации как тензорной величины.

Для горно-геологических условий Южно-Белозерского месторождения, в диапазоне глубин  $500-900$  м, проанализировано увеличение проницаемости, обусловленное дополнительным раскрытием трещин. Установлены закономерности изменения коэффициента фильтрации от параметров трещиноватости в зоне влияния выработки. Дальнейшим развитием методики является учет близкого расположения нескольких выработок, а также нескольких систем трещин с различными параметрами.

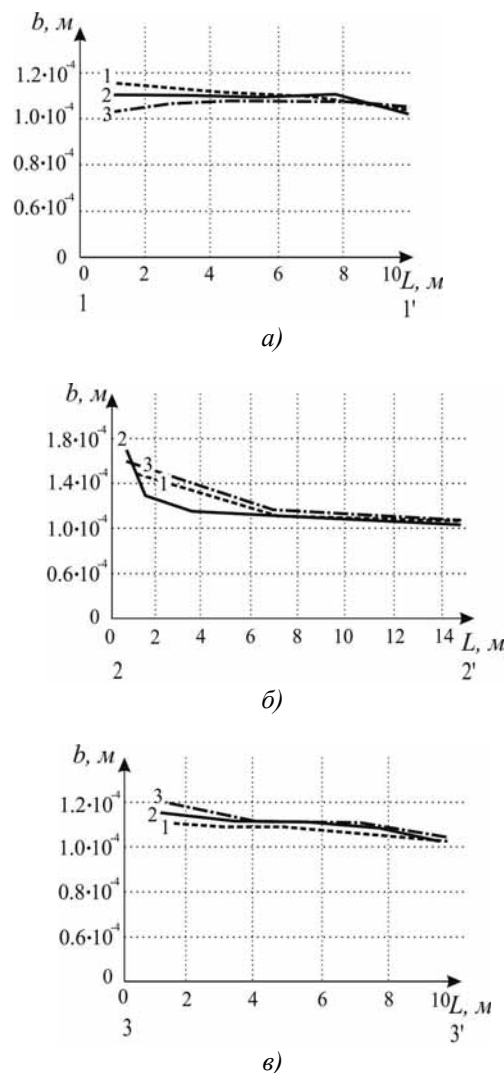


Рис. 4. Изменение раскрытия трещины  $b$  в зависимости от расстояния  $L$  (м) до контура выработки по профилям 1–1' (а), 2–2' (б), 3–3' (в); угол падения трещин  $\beta = 60^\circ$  (1),  $\beta = 45^\circ$  (2),  $\beta = 45^\circ$  (3)

**Список литературы / References**

1. Шашенко О.М. Геомеханічні процеси у породних масивах / Шашенко О.М., Майхерчик Т., Сдвижкова О.О. – Дніпропетровськ: НГУ, 2005. – 319 с.  
Shashenko, O.M., Maikherchik, T. and Sdvizhkova, O.O. (2005), *Geomekhanichni protsesy u porodnykh masyvakh* [Geomechanical Processes in Massif], National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine.

2. Teutsch, G. (2005), *Flow and Transport in Fractured Porous Media*, Springer Verlag.

3. Садовенко И.А. Научные основы управления геофильтрационным состоянием породного массива вокруг горных выработок: автореф. дис... д-ра техн. наук / Садовенко Иван Александрович // Днепропетровский горный ин-т. – Днепропетровск, 1992. – 455 с.

Sadovenko, I.A. (1992), "Scientific base for massif filtration properties control around mine workings," Abstract of Dr. Sci. (Tech.) dissertation: 05.15.04; 05.15.11, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.

4. Рудаков Д.В. Обоснование модели инфильтрационных потоков в неоднородном подработанном массиве горных пород / Рудаков Д.В., Садовенко И.А. // Сб. науч. трудов ДНТУ – Донецк, 2005. – №13. – С. 3–15.

Rudakov, D.V. and Sadovenko, I.A. (2005), "Substantiation of seepage model in undermined heterogeneous massif", *Sb. nauch. trudov DNTU*, Donetsk, no.13, pp. 3–15.

5. Громадка П.Т. Комплексный метод граничных элементов в инженерных задачах / Громадка П.Т., Лей Л. – М.: Мир, 1990 – 303 с.

Gromadka, P.T. Ley, L. (1990), *Kompleksnyy metod granichnykh elementov v inzhenernykh zadachakh* [The Complex Boundary Elements Method in Engineering Problems], Mir, Moscow, Russia.

**Мета.** Оцінка змін проникності тріщинуватих порід внаслідок збурень напружено-деформованого стану вміщуючи порід, обумовлених проходженням підземної виробки.

Об'єкт досліджень представлено локальною областю породного масиву навколо горизонтальних виробок на глибинах до 900 м, характерних для рудних родовищ Центральної України.

**Методика.** У статті запропоновано методику, що заснована на чисельному моделюванні напружено-деформованого стану масиву і розрахунку коефіцієнта фільтрації за параметрами тріщинуватості, що дозволяє оцінити проникність тріщинуватих порід у зоні розташування підземних виробок. Верифікація моделі виконана для гірничо-геологічних умов Південно-Білозерського родовища.

**Результати.** Вивчено характер змін зони активної тріщинуватості при різних глибинах, властивостях порід і параметрах тріщин: довжині, величині розкриття, відстані між тріщинами, куті нахилу. Практичний інтерес представляють зміни проникності як у межах шахтного поля, так і навколо окремих виробок. Встановлено закономірності зміни коефіцієнта фільтрації в залежності від характеристик тріщинуватих порід. Встановлено зони зміни коефіцієнта фільтрації в 2–3 рази відносно значень для непорушених порід навколо виробки при куті падіння тріщин від 0° до 90°, що залежать від відстані між тріщинами. Найбільші зміни характерні для кута падіння 45°, причому довжина зон сягає 3–5 радіусів виробки.

**Наукова новизна.** На основі чисельного моделювання напружено-деформованого стану порід виконано аналіз зони локальних змін проникності тріщинуватих порід навколо підземної виробки круглого перерізу при різному куті падіння тріщин.

**Практична значущість.** Уточнено значення коефіцієнта фільтрації в зоні впливу підземних виробок дозволяють виконувати обґрунтовані прогнози гідродинамічного режиму в порушеному масиві порід при затопленні шахт.

**Ключові слова:** породний масив, проникність, підземна виробка, напружено-деформований стан, коефіцієнт фільтрації, система тріщин, чисельне моделювання

**Purpose.** To estimate changes in the fractured rocks permeability caused by the disturbances in the stress-strain state of rocks appeared during driving of an underground excavation. The studied site is a local zone in rock mass around a horizontal working at depths down to 900 m, which is characteristic for ore deposits of central part of Ukraine.

**Methodology.** A method of estimation of permeability of fractured rocks around underground excavations was developed. It was based on numerical simulation of the stress-strain state of rocks and allows calculating hydraulic conductivity according to fracture parameters. The model was verified in the mining and geological conditions of Pivdenno-Bilozerske deposit. The deviations in hydraulic conductivity up to 2–3 times from the mean undisturbed value were established. They depend on fractured rock parameters such as tilt angle and distance between joints. The more significant changes were predicted for tilt angle of 45°, with extension of these zones reaching 3–5 excavation radiuses.

**Findings.** The nature of changes in the active zone of fractures at different depths, rock properties and parameters of joints such as length, the disclosure value, the distance between joints, tilt angle have been investigated. Permeability changes both within the mined out zone and around the single excavations are of practical interest. However, the local excavation impact on shaping the field permeability has not been investigated properly yet.

**Originality.** Numerical modeling of the stress-strain state was used in analysis of local changes of fractured rock permeability in the zone around underground excavations of circular cross section at different fracture inclination angles.

**Practical value.** More exact values of conductivity in the zone affected by underground excavation allow for more reliable predictions of the hydrodynamic behavior in mined out rocks in the mines to be flooded.

**Keywords:** rock massif, permeability, underground excavation, stress-strain state, hydraulic conductivity, fracture system, numerical modeling

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.О. Сдвижковою. Дата надходження рукопису 17.06.11