

УДК 622.831.325.3

Сердюк Иннокентий Михайлович,
инженер-исследователь,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
Сибирское отделение РАН,
630091, г. Новосибирск, Красный пр., 54
e-mail: ken04588@gmail.com

Евстигнеев Дмитрий Сергеевич,
младший научный сотрудник,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
Сибирское отделение РАН
e-mail: rdx@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ И ИЗВИЛИСТОСТИ ТРЕЩИНЫ В УГОЛЬНОМ КЕРНЕ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Аннотация:

В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением фильтрационно-емкостных свойств трещин угольного керна на основе анализа изображений анилифов, снятых сканирующим электронным микроскопом. С привлечением численного моделирования уравнений газодинамики исследуются особенности установившегося ламинарного режима течения газа в единичной трещине. Показано, что на уменьшение скорости потока газа, проходящего по трещине в угле, существенно влияют ее геометрические особенности. Расход газа в первую очередь зависит от ширины раскрытия трещины и ее извилистости. Остальные факторы, такие как шероховатость, ее тип и клиновидность, меньше влияют на величину потерь напора газа по длине трещины. Простая модификация уравнения Буссинеска, учитывающая вклад каждого фактора, обусловленного геометрией трещины, позволяет описать процесс течения газа в реальной трещине. На примере исследования анилифов, подготовленных из угольного керна, выбуренного из крупного куска угля Пермьяковского разреза Караканского угольного месторождения методом электронной микроскопии и последующей цифровой обработкой полученных изображений с привлечением численных методов моделирования течения газа, показано, что наибольшее сопротивление движению газа в трещине оказывает ее извилистость. Разработана методика определения ширины раскрытия, извилистости и шероховатости берегов трещины, которая позволяет как определить перечисленные геометрические параметры трещины, так и рассчитать газопроницаемость по ней. При необходимости возможно применить методику для предсказания газопроницаемости в угольном кернах, но для этого необходимо произвести расчеты смыкания берегов трещины, обусловленные наложением горного давления на границу поверхности керна.

Ключевые слова: уголь, трещина, анилиф, потери потока при фильтрации, ширина раскрытия трещины, шероховатость, извилистость, газопроницаемость.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.080

Serdyuk Innokenty M.,
Research Engineer,
N.A. Chinakal Institute of Mining,
Siberian Branch of RAS,
630091 Novosibirsk, 54 Krasnyi Prospekt.
e-mail: ken04588@gmail.com

Evstigneev Dmitry S.,
Junior Researcher,
N.A. Chinakal Institute of Mining,
Siberian Branch of RAS,
e-mail: rdx@gmail.com

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR RESEARCHING THE OPENING WIDTH AND TORTULUSITY OF A CRACK IN A COAL CORE ACCORDING TO ELECTRON MICROSCOPY DATA

Abstract:

The article discusses issues related to the determination of filtration-capacitance properties of cracks in coal core based on the analysis of images of polished sections taken with a scanning electron microscope. Using numerical modeling of gas dynamics equations, the features of the steady-state laminar gas flow regime in a single crack are studied. It has been shown that the decrease in the speed of gas flow passing through a crack in coal is significantly influenced by its geometric features. Gas consumption primarily depends on the opening width of the crack and its tortuosity. Other factors, such as roughness, its type and wedge shape, make a smaller contribution to the amount of gas pressure loss along the length of the crack. A simple modification of the Boussinesq equation, taking into account the contribution of each factor determined by the geometry of the crack, allows us to describe the process of gas flow in a real crack. Using the example of studying polished sections prepared from a coal core drilled from a large piece of coal from the Permyakovsky section of the Karakan coal deposit using electron microscopy and subsequent digital processing of the resulting images using numerical methods for modeling gas flow, it is shown that the greatest resistance to gas movement in a crack is provided by its tortuosity. A method has been developed for determining the opening width, tortuosity and roughness of the crack faces, which allows both to determine the listed geometric parameters of the crack and to calculate the gas permeability along it. If necessary, it is possible to apply the technique to predict gas permeability in a coal core, but for this it is necessary to calculate the closure of the crack faces due to the imposition of rock pressure on the boundary of the core surface.

Key words: coal, crack, polished section, flow loss during filtration, crack opening width, roughness, tortuosity, gas permeability.

Введение

Для угольных месторождений характерен особый вид очень мелкой трещиноватости – кливаж [1–3]. Его проявление связано с процессом напластования угля вдоль параллельных плоскостей. Порода приобретает свойства мелкой делимости и склонна к разрушению, сыплется. Обычно наиболее выражен кливаж осевой плоскости, ориентированный параллельно осевым плоскостям складок [2]. Процессы фильтрации метана по сложившейся системе трещин тесным образом связаны с их пространственной ориентировкой, густотой, главным направлением развития трещиноватости и с влиянием различных элементов геометрии трещины [2, 4], и главным фактором здесь является ширина раскрытия трещины. Проницаемость трещиноватой среды пропорциональна кубу средней ширины раскрытия трещин [4]. Также немаловажное значение имеют потери напора газа в самой трещине, обусловленные шероховатостью поверхности берегов трещины, ее типом, клиновидностью и извилистостью [5]. Воспользуемся современными техническими возможностями сканирующего электронного микроскопа и методами обработки цифровых изображений для исследования фильтрационно-емкостных свойств трещин угольного керна, выбуренного из крупных кусков угля, отобранного из Пермьковского разреза Караканского угольного месторождения. Для достижения поставленной цели необходимо разработать методику исследования ширины раскрытия и извилистости трещины.

Теоретическая модель фильтрации газа в трещиноватых средах

Рассмотрим течение газа в канале прямоугольной формы длиной L , шириной δ и высотой h . Расход газа Q , проходящего через площадь поперечного сечения $S = \delta \cdot h$, будет описываться уравнением Буссинеска [4, 6]:

$$Q = -\frac{\delta^3 h}{12\mu} \nabla p, \quad (1)$$

в котором μ – динамическая вязкость газа; p – давление.

Выразим линейную скорость истечения газа u из (1):

$$u = \frac{Q}{\delta \cdot h} = -\frac{\delta^2}{12\mu} \nabla p. \quad (2)$$

Формула (2) справедлива для расчета течения газа в каналах и трещинах с гладкими прямолинейными стенками. В реальных трещиноватых породах скорость фильтрации будет меньше, ввиду того что в (2) не учитываются потери напора при ламинарном движении, вызванные влиянием различных элементов геометрии трещины на сопротивление потоку газа. Частично решает проблему введение коэффициента сопротивления движению, учитывающего влияние шероховатости трещины $\xi_{\text{ш}}$ [7–9]:

$$u = \frac{\delta^2}{12\mu\xi_{\text{ш}}} \nabla p, \quad (3)$$

который можно определить по эмпирической формуле [7, 9]:

$$\xi_{\text{ш}} = 1 + 8,8 \left[\frac{\Delta}{D_{\Gamma}} \right]^{1,5}, \quad (4)$$

где Δ – шероховатость поверхности трещины; Δ / D_{Γ} – безразмерный параметр, выражающий относительную шероховатость трещины (D_{Γ} – гидравлический диаметр).

Перечислим все факторы потерь потока, влияющие на сопротивление движению газа в трещине по всей ее длине, за исключением местных потерь [5]:

$$f = f_{\text{гл}} \xi_{\text{ш}} \xi_{\text{т}} \xi_{\text{к}} \xi_{\text{л}},$$

где $f_{\text{гл}} = 6/\text{Re}$ – сопротивление движению в основной простейшей модели идеальной трещиноватой породы – гладкой щели с параллельными стенками (Re – число Рейнольдса),

а все прочие сомножители учитывают шероховатость, тип шероховатости, клиновидность и удлинение пути вследствие извилистости трещин.

Коэффициент извилистости ξ_ℓ , повышающий сопротивление движению f , определяется по формуле [5]:

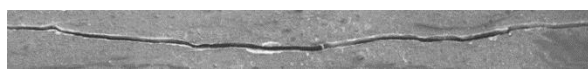
$$\xi_\ell = \frac{\ell}{L}, \quad (5)$$

где ℓ – протяженность реального пути фильтрации, L – кратчайшее расстояние между двумя точками фильтрационного поля.

Описание методики исследования ширины раскрытия и извилистости трещины

Ширину раскрытия трещины δ , а также ее шероховатость Δ , коэффициент извилистости ξ_ℓ определим, обрабатывая фотографии аншлифов, снятые сканирующим электронным микроскопом Hitachi S-3400N с увеличением в 8 раз.

Из угольного керна цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм, извлеченного из Пермьяковского разреза Караканского угольного месторождения (Кузнецкий бассейн), подготовлены аншлифы и исследованы под микроскопом. Уголь марки «D» обладает плотной структурой с мелкой трещиноватостью. На фотографиях аншлифов четко прослеживаются как большие, видимые даже человеческим глазом магистральные трещины, так и множество мелких, различимых только под микроскопом. Фильтрация газа в таком угле осуществляется по существующей системе трещин. На рис. 1 приведена фотография поверхности аншлифа угольного керна с хорошо прослеживающейся трещиной, а также результат очистки фона, содержащего угольное вещество, поры и включения минералов.



Фотография трещины



Убран фон, выделена трещина

Рис. 1. Фотография трещины на поверхности аншлифа угля

Коэффициент извилистости ξ_ℓ и ширину раскрытия вдоль трещины определим численно, решив газодинамическую задачу течения азота по ней. Режим течения в трещине – ламинарный, установившийся, газ считаем слабо сжимаемым, тогда определяющие уравнения составляют уравнение сохранения импульса и неразрывности:

$$\begin{aligned} p(u \cdot \nabla)u &= \nabla \cdot [-pI + K]; \\ p\nabla \cdot u &= 0; \\ K &= \mu(\nabla u + (\nabla u)^T), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j}$ – оператор набла в прямоугольной системе координат;

$\vec{i}$, $\vec{j}$ – единичные векторы по осям x и y ; I – единичная матрица;

K – тензор вязких напряжений.

Полагая, что процесс течения газа в трещине изотермический, дополним систему уравнений (6) уравнением состояния для квазисовершенного газа:

$$\frac{p}{\rho} = Z \cdot R \cdot T, \quad (7)$$

где Z – коэффициент сжимаемости газа; $R = R_0 / M$ – газовая постоянная;

R_0 – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса газа; T – температура газа.

На левой границе трещины поставим граничное условие в виде развитого потока со скоростью 0,01 м/с, а на правой – абсолютное давление, равное атмосферному 1 атм. Начальное давление газа в трещине примем 1 атм, скорость потока 0 м/с.

После численного решения поставленной задачи течения газа в трещине получим поле скоростей, из которого выделим максимальную по абсолютной величине скорость в сечении потока $u_{\max}$. Для скорости $u_{\max}$, имея ее пространственные координаты точек (x_i, y_i) , рассчитаем путь, пройденный частичкой по потоку вдоль трещины ℓ . Расстояние ℓ_i между двумя точками координат (x_{i-1}, y_{i-1}) , (x_i, y_i) рассчитаем по теореме Пифагора, $\ell_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$ тогда общая длина ломаной $\ell = \sum_{i=1}^n \ell_i$,

где n – число точек разбиения. Линейное расстояние между левым и правым концом трещины $L = \sqrt{(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2}$. По формуле (5) определим коэффициент извилистости ξ_ℓ .

Ширину раскрытия вдоль трещины с привязкой к координатам узлов звеньев ломаной δ_i определим как расстояние между берегами трещины по прямой, уравнение которой задается точкой координаты узла ломаной (x_i, y_i) и вектором нормали к пути ℓ . Построим кусочно-квадратичный полином для интерполяции ℓ на отрезке $[x_{i-1}, x_{i+1}]$. Для каждой трех узловых точек звеньев ломаной (x_{i-1}, y_{i-1}) , (x_i, y_i) , (x_{i+1}, y_{i+1}) запишем уравнение параболы:

$$y(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2. \quad (8)$$

Подставив в (8) координаты точек (x_{i-1}, y_{i-1}) , (x_i, y_i) , (x_{i+1}, y_{i+1}) и разрешив полученную систему уравнений относительно коэффициентов a_0, a_1, a_2 , получим:

$$a_0 = y_{i-1} - a_1 \cdot x_{i-1} - a_2 \cdot x_{i-1}^2;$$

$$a_1 = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} - a_2 \cdot (x_i + x_{i-1}); \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{(x_{i+1} - x_{i-1}) \cdot (x_{i+1} - x_i)} - \frac{y_i - y_{i-1}}{(x_i - x_{i-1}) \cdot (x_{i+1} - x_i)}.$$

Вычислим производную от уравнения параболы (8):

$$y'(x) = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot x. \quad (10)$$

Тогда с учетом (10) уравнение нормали к линии ℓ в точке (x_i, y_i) будет

$$y_{\text{норм}}(x) = -\frac{1}{y'(x_i)}(x - x_i) + y_i. \quad (11)$$

После нахождения δ_i по всем узлам ломаной рассчитаем среднеарифметическое значение $\langle \delta \rangle$, которое и примем за среднюю ширину раскрытия трещины δ .

Под шероховатостью поверхности трещины Δ будем понимать среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой длины ℓ . В терминах ГОСТа [10] Δ совпадает с Ra :

$$\Delta = \frac{1}{\ell} \int_0^\ell (\delta(x) - \langle \delta \rangle) dx, \quad (12)$$

где $\delta(x)$ – интерполяционная кривая, построенная по точкам δ_i по длине пути ℓ .

Рассчитав по формуле (12) Δ , из уравнения (4) найдем коэффициент шероховатости трещины $\xi_{ш}$. При этом положим гидравлический диаметр D_H равным средней ширине раскрытия трещины δ .

Результаты исследования

Численное моделирование ламинарного течения газа по трещине в статической постановке по уравнениям (6), (7) выполним методом конечных элементов в программном комплексе COMSOL Multiphysics. В программе есть возможность импорта растрового изображения с последующей интерполяцией его перевода в векторные кривые с помощью модуля Image to Curve. Рассчитав поле скоростей течения газа в трещине, выделим из него максимальную по абсолютной величине скорость в сечении потока $u_{\max}$, показанную на рис. 2 отдельной красной линией.

Длина пути выделенной линии ℓ равна 27,236 мм, а линейное расстояние между левым и правым концом трещины $L=26,943$ мм. Следовательно, коэффициент извилистости трещины, рассчитанный по (5), составит $\xi_\ell=1,011$.

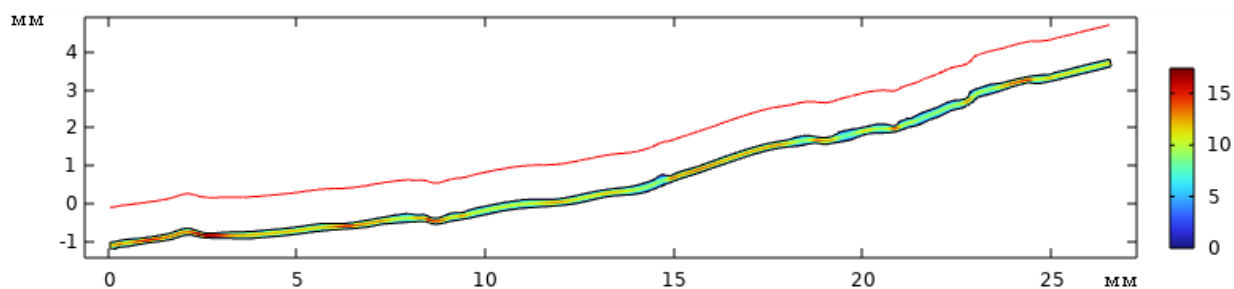


Рис. 2. Поле скорости течения газа в трещине, м/с

Разобьем линию $u_{\max}$ вдоль трещины на равные интервалы и в серединах каждого из них построим уравнение нормали (10). Зададим на уравнении нормали две точки, расположенные симметрично относительно рассматриваемой линии, расстояние между которыми положим равным 1 мм, как показано на рис. 3.

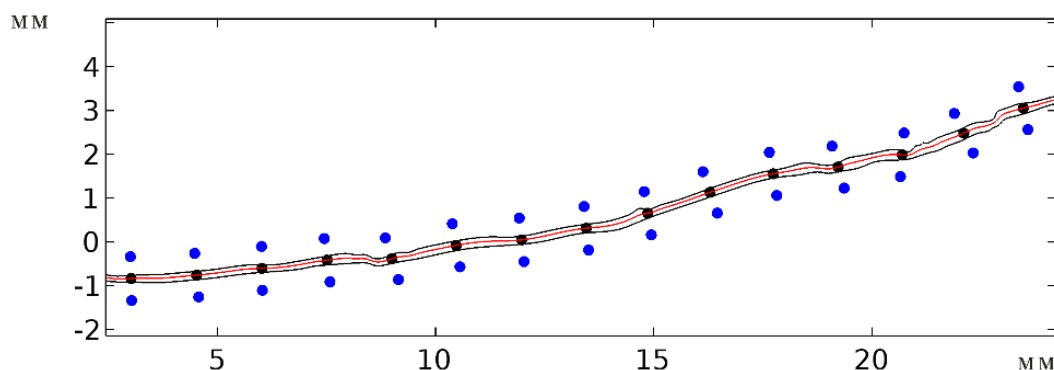


Рис. 3. Разбиение трещины на интервалы вдоль линии ℓ

Измерим ширину раскрытия трещины на каждом интервале вдоль линии модуля максимальной скорости течения газа и рассчитаем ее среднеарифметическое значение $\langle \delta \rangle = 0,197$ мм. Построим график изменения ширины раскрытия трещины δ_i по ее длине ℓ (рис. 4).

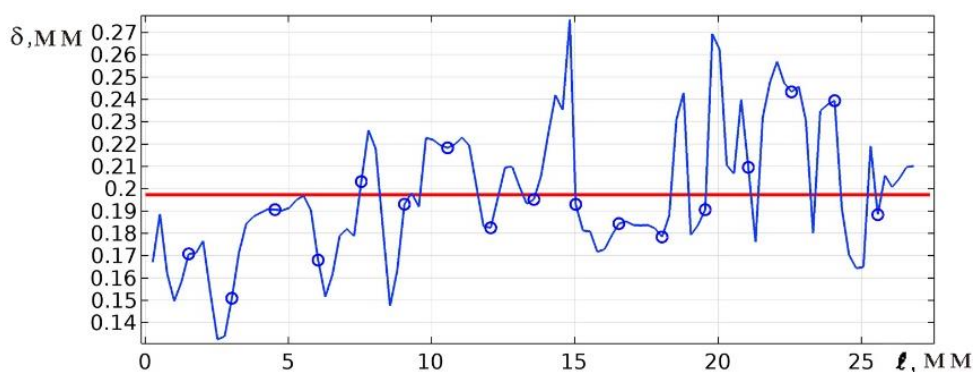


Рис. 4. Изменение ширины раскрытия трещины вдоль линии ℓ

Расчетное значение шероховатости поверхности трещины Δ , вычисленное по формуле (11), составило 19 нм. Коэффициент шероховатости по (4) $\xi_{ш} = 1,00001$.

Выводы

Потери скорости потока газа в трещине обусловлены влиянием различных элементов геометрии трещины: шириной раскрытия, шероховатостью и ее типом, клиновидностью и извилистостью.

Обработка изображений поверхности аншлифов угольного керна, полученного со сканирующего электронного микроскопа с применением предложенной методики, позволяет определить основные геометрические параметры, влияющие на сопротивление потоку газа в трещине. В частности, исследования, проведенные на примере угольного керна, позволили определить среднюю ширину раскрытия трещины – 0,197 мм, коэффициенты шероховатости – 1,00001 и извилистости – 1,011.

Газопроницаемость единичной трещины пропорциональна квадрату раскрытия трещины. Проведенные исследования по определению средней ширины раскрытия трещины позволяют получить максимальную оценку газопроницаемости угольного керна без учета горного давления. В условиях лабораторного эксперимента, при приложении обжимающего давления на поверхность угольного керна трещины будут сжиматься и, следовательно, газопроницаемость в них будет падать. Однако методика будет работать и в этом случае. Для этого необходимо численно промоделировать смещение берегов трещины, вызванное приложенной нагрузкой, и произвести расчеты по предложенной методике.

Список литературы

1. Лыков И.Ф., 1976. *Кливаж и его влияние на характер обрушения пород*. Москва: Недра, 227 с.
2. Епифанцев О.Г., Плетенчук Н.С., 2008. *Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения*. Метод. реком. Новокузнецк: СибГИУ, 41 с.
3. Чернышов С. Н., 1983. *Трещины горных пород*. Учебник. Москва: Наука, 240 с.
4. Пономарева И.Н., Мордвинов В.А., 2009. *Подземная гидромеханика*. Учебное пособие. Пермь, Перм. гос. техн. ун-т, 103 с.
5. Ломизе Г.М., 1951. *Фильтрация в трещиноватых породах*. Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 127 с.
6. Тиаб Дж., Доналдсон Э.Ч., 2009. *Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов*. Справочник. Москва: ООО «Премиум Инжиниринг», 868 с.

7. Zhang Sh., Liu X., Wang K., 2024. The friction factor of the fracture-matrix system considering the effects of free flow, seepage flow, and roughness. *Journal of Hydrology*, Vol. 628, P. 130602. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130602
8. Louis C.A., 1969. *A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses*. London: Imperial College of Science and Technology, 90 P.
9. Kim Y.I., Amadei B., Pan E., 1999. Modeling the effect of water, excavation sequence and rock reinforcement with discontinuous deformation analysis. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 36, No 7, P. 949–970. DOI: 10.1016/S0148-9062(99)00046-7.
10. *Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики*. ГОСТ 2789-73 - Введ. 1973-04-23. Москва: Стандартинформ, 2018, 6 с.

References

1. Lykov I.F., 1976. Klivazh i ego vliyanie na kharakter obrusheniya porod [Cleavage and its influence on the nature of rock collapse]. Moscow: Nedra, 227 p.
2. Epifantsev O.G., Pletenchuk N.S., 2008. Treshchinovatost' gornyx porod [Rock fracturing. Fundamentals of theory and study methods]. *Osnovy teorii i metody izucheniya. Metod. rekom.* Novokuznetsk: SibGIU, 41 p.
3. Chernyshov S. N., 1983. Treshchiny gornyx porod. Uchebnik [Rock cracks]. Moscow: Nauka, 240 p.
4. Ponomareva I.N., Mordvinov V.A., 2009. Podzemnaya gidromekhanika [Underground hydromechanics]. Uchebnoe posobie. Perm', Perm. gos. tekhn. un-t, 103 p.
5. Lomize G.M., 1951. Fil'tratsiya v treshchinovatykh porodakh [Filtration in fractured rocks]. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 127 p.
6. Tiab Dzh., Donaldson E.Ch., 2009. Petrofizika: teoriya i praktika izucheniya kollektorskikh svoystv gornyx porod i dvizheniya plastovykh flyuidov [Petrophysics: theory and practice of studying reservoir properties of rocks and movement of formation fluids]. Spravochnik. Moscow: OOO "Premium Inzhiniring", 868 p.
7. Zhang Sh., Liu X., Wang K., 2024. The friction factor of the fracture-matrix system considering the effects of free flow, seepage flow, and roughness. *Journal of Hydrology*, Vol. 628, P. 130602. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130602
8. Louis C.A., 1969. *A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses*. London: Imperial College of Science and Technology, 90 p.
9. Kim Y.I., Amadei B., Pan E., 1999. Modeling the effect of water, excavation sequence and rock reinforcement with discontinuous deformation analysis. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 36, No 7, P. 949–970. DOI: 10.1016/S0148-9062(99)00046-7.
10. Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki [Surface roughness. Parameters and characteristics]. GOST 2789-73 - Vved. 1973-04-23. Moscow: Standartinform, 2018, 6 p.