

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.831.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/14>

Сергієнко О.І.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Сергієнко Л.В.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІСКОВИКУ НА ЙОГО ФІЛЬТРАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ

Мета. Виконати лабораторні дослідження впливу деформаційних характеристик на фільтраційні параметри пісковика.

Методика досліджень. Лабораторні випробування процесу фільтрації флюїду через зразок пісковика при навантаженні на одноосьове стискання. Чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану гірського масиву навколо виробленого простору.

Результати досліджень. У статті запропоновано методику лабораторного випробування фільтраційних параметрів гірських порід під навантаженням. Проведені лабораторні дослідження по визначенню фільтраційних параметрів гірських порід з урахуванням їх деформаційних властивостей. Отримана емпірична залежність коефіцієнта проникності зразка пісковика від лінійних деформацій у вигляді поліному п'ятого ступеню. Зіставлені результати чисельного моделювання об'ємного напружено-деформованого стану з визначеним коефіцієнтом проникності газу. Визначені зони фільтраційних шляхів метану у пісковіку основної покрівлі.

Наукова новизна. Вперше отримана залежність коефіцієнту проникності від лінійних деформацій пісковіку. Вперше представлені результати фільтраційних властивостей пісковіку основної покрівлі над виробленим простором. Вперше представлений спосіб прогнозування зон підвищеної газонасиченості у пісковіках основної покрівлі з урахуванням фільтраційних властивостей та об'ємного напружено-деформованого стану.

Практичне значення. Практичне значення полягає у прогнозуванні можливих фільтраційних шляхів метану у пісковіку та зон накопичення вільного метану. Визначення положення зон скупчення вільного метану, та отримання параметрів буріння дегазаційних свердловин для забезпечення ефективної дегазації гірського масиву.

Ключові слова: процес фільтрації газу, коефіцієнт проникності газу, навантаження, чисельне моделювання, лабораторні випробування, пісковик, гірський масив, об'ємний напружено-деформований стан, вироблений простір.

Постановка проблеми. Фільтраційні процеси у шахтах мають негативний характер, з ними пов'язані витікання повітря, приплив метану та всі газодинамічні явища.

Фільтруючими потоками можуть бути вода, повітря, метан та інші гази. Схеми течії фільтраційних потоків може бути дуже різноманітні, що залежить від безлічі гірничотехнічних чинників. Особливий вплив на фільтраційні здібності порід впливає їх напружено-деформований стан. Отже, дослідження фільтраційних властивостей гірських порід з урахуванням напружено-деформованого стану є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [1] розглянуто особливості сумісного перебігу зв'язаних процесів деформування вуглепородного масиву і фільтрації газу, що міститься в тріщинно-поровому просторі вугілля і порід, розроблено математичну модель з урахуванням взаємного впливу цих процесів.

Сучасна методика дослідження проникності гірських порід в об'ємному полі стискаючих напруг описана в джерелі [2]. Зразок поміщають в установку тривісного навантаження і при різному напруженому стані зразків вугілля досліджують його фільтраційні властивості. У цій методиці використовується стислий газ під початковим тиском.

Розробкою способу визначення механічних характеристик зразків гірських порід у газонасиченому стані займалися автори [3]. Механічні випробування зразків проводилися у герметичній камері високого тиску, в якій до початку випробувань зразки насичували газом.

Авторами [4] доведено, що коефіцієнт фільтрації знаходиться в лінійній залежності від величини об'ємної деформації та пов'язаної з нею величиною проникності. Дана залежність дозволяє вести прогноз цих величин на стадії лабораторних досліджень породних зразків в режимі заданих деформацій.

У роботі [5] наголошується, що в результаті експериментальних досліджень отримані дані, що свідчать про наявність близької до лінійної залежності між коефіцієнтом фільтрації пісковиків порід та величиною об'ємної деформації, причому характер залежності зберігає свій вигляд для всіх випробуваних у лабораторних умовах зразків піщаних порід. Судячи з характеру випробувань, така залежність застосовна для порід, що у граничному напруженому стані.

Стенди для досліджень фільтраційних характеристик зразків вугілля були розроблені авторами [6], та проведені ними лабораторні дослідження їх фільтраційних характеристик [7].

В роботі [8] запропоновано методику лабораторного експерименту щодо дослідження фільтраційних властивостей гірських порід, та проведені лабораторні роботи з дослідження фільтраційних властивостей гірських порід. З урахуванням цих досліджень були проведені чисельні дослідження фільтраційних властивостей гірського масиву під час проведення очисних робіт [9].

Отже пропонуються лабораторні дослідження фільтраційних властивостей пісковиків з урахуванням його деформаційного стану.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження впливу деформаційних характеристик на фільтраційні параметри пісковиків.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

- лабораторні випробування фільтрації газу (повітря) через зразки пісковиків під навантаженням на одноосьове стискання;
- визначення залежності коефіцієнту проникності від лінійної деформації зразка пісковиків;
- чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану гірського масиву навколо виробленого простору;
- прогнозування зон підвищеної газонасиченості у пісковиках основної покрівлі з урахуван-

ням фільтраційних властивостей та об'ємного напружено-деформованого стану.

Методи дослідження: лабораторні випробування фільтрації газу через зразок пісковиків під навантаженням на одноосьове стискання, чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану гірського масиву (метод кінцевих елементів), метод суцільних середовищ, метод контактної взаємодії поверхонь.

Виклад основного матеріалу. Процес фільтрації відбувається через пористе середовище, що характеризується коефіцієнтом фільтрації. В залежності від в'язкості флюїду та фільтраційних властивостей гірських порід при дослідженнях використовується коефіцієнт проникності.

Напружено-деформований стан впливає на фільтраційні властивості пісковиків тим, що змінює пористе середовище, деформує та поширює пори та тріщини. Тому для визначення впливу деформаційних характеристик на фільтраційні властивості пористого середовища необхідний пристрій, який дозволить провести лабораторні дослідження фільтраційних характеристик середовища з додатковим статичним навантаженням на випробувальний зразок.

Для виконання випробування «фільтрації з тиском» був розроблений та виготовлений пристрій, фільтраційна камера якого дозволяє одночасно проводити випробування на фільтраційні властивості та задавати навантаження на випробувальний зразок (рис. 1). Дослідження проводилися на зразках пісковиків шахти «Капітальна».

Схема лабораторної установки та зовнішній вигляд відображені на рисунку 2. Лабораторна установка складається з наступних елементів: фільтраційна камера з поршнем; вакуумний ковпак, вакуумметри (*A*, *B*); індикаторна стійка з індикатором годинникового типу; компресор; перероблений під випробування гідравлічний прес БП-29; засувки (*1*, *2*, *3*).

Ідея експерименту полягає в наступному: для визначення витрати повітря використовується вакуумний ковпак визначеного об'єму, з якого відсмоктується повітря за допомогою компресору за певний проміжок часу. Знаючи витрати повітря, депресію та геометричні параметри зразка можемо визначити коефіцієнт проникності випробувального зразка під заданим навантаженням.

Методика проведення експерименту полягає в наступному: зразок пісковиків поміщають до фільтраційної камери, попередньо змазав дві контактні сторони герметиком по їх периметру. Задается на навантажувальному пристрої певний

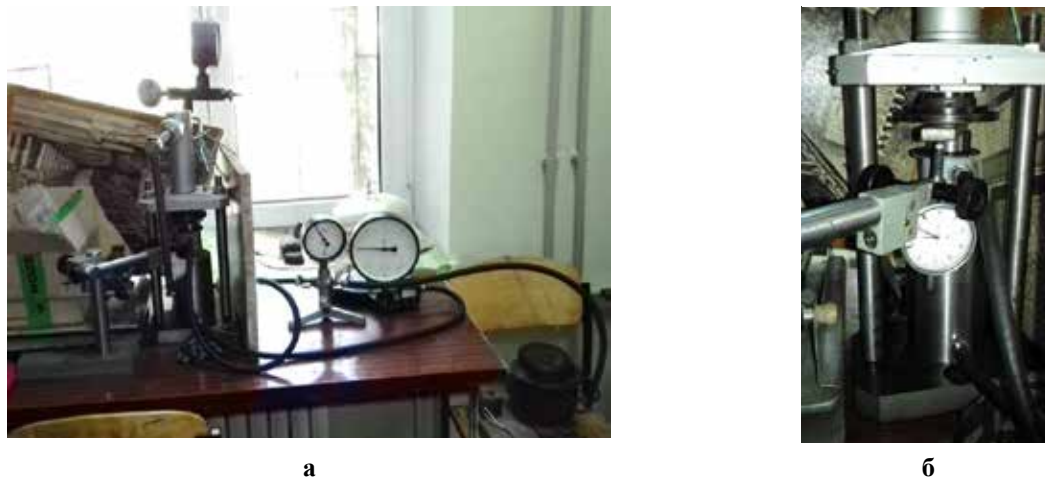


Рис. 1. Лабораторна установка для випробування на фільтраційні властивості зразків пісковиків під навантаженням (одноосьове стиснення):
а – зовнішній вигляд лабораторної установки; б – фільтраційна камера

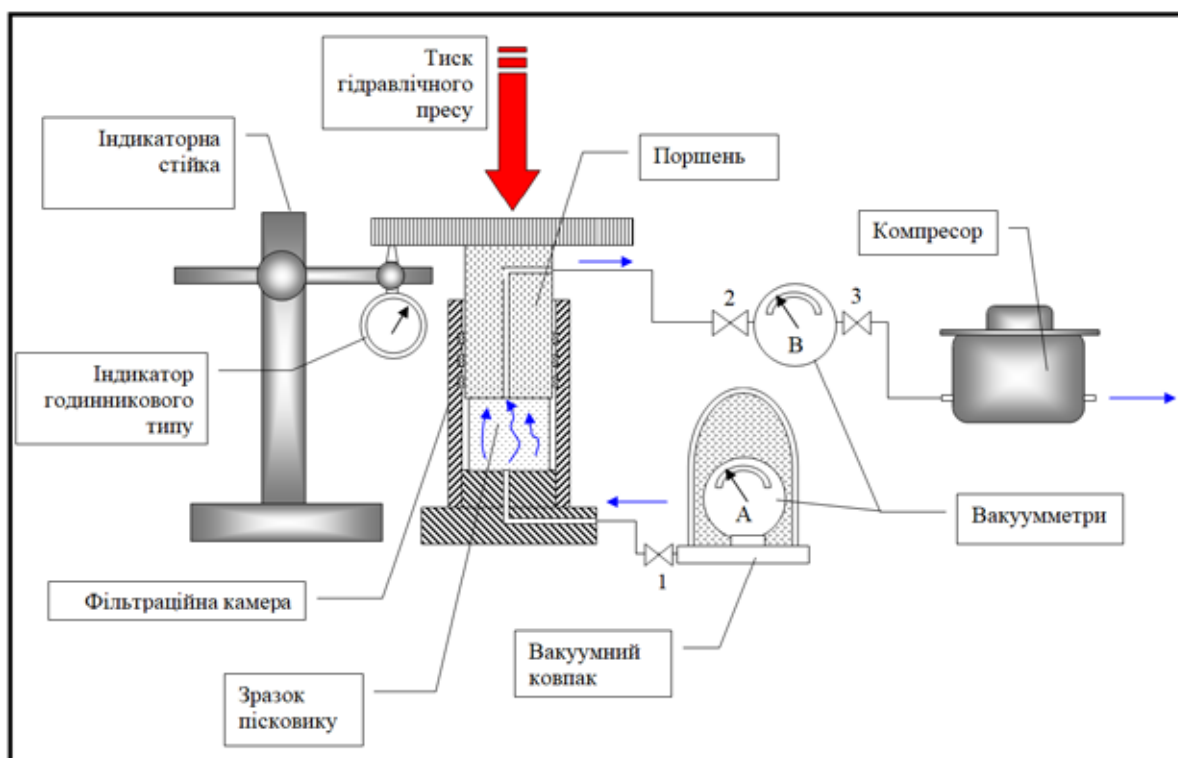


Рис. 2. Загальна схема лабораторної установки

тиск; засувка 1 у положенні «зачинено»; засувки 2, 3 у положенні «відчинено»; компресором відсмоктується повітря з пристрою фільтраційної камери до мінімального тиску повітря (вакуумметр В). Далі засувку 1 ставиться у положенні «відчинено» і заміряється час фільтрації повітря з вакуумного ковпака через випробувальний зразок до досягнення мінімального значення вакуумметра А.

Коефіцієнт проникності визначається за формулою [3]:

$$k_{np} = \frac{Q \cdot \Delta l \cdot \eta}{\Delta P \cdot S \cdot t}, \quad (1)$$

де Q – кількість газу, що пройшов через зразок породи, м³;

Δl – шлях фільтрації, м;

S – площа поперечного перерізу зразка, м²;

ΔP – перепад тиску на шляху фільтрації, Па;

t – час фільтрації, с;

η – в'язкість газу (повітря), Па·с.

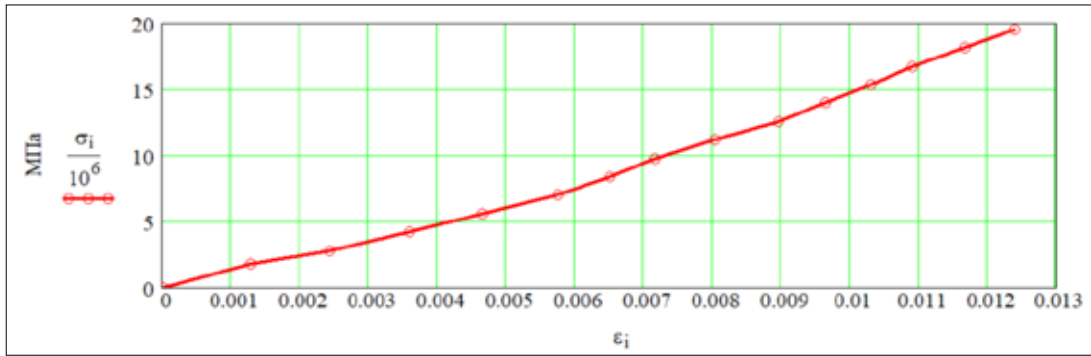


Рис. 3. Діаграма навантаження зразка пісковику в камері фільтрації

Отримані наступні механічні характеристики. Діаграма навантаження зразка пісковику в камері фільтрації показала пружні деформаційні властивості (рис. 3).

Максимальний тиск пресу БП-29 при максимальному зусиллі на зразок, який дорівнює 4,5 тон – склав 20 МПа. Середній модуль пружності дорівнює 1,365 ГПа (рис. 4).

Отримали залежність коефіцієнту проникності від лінійних деформацій зразка $k(\epsilon) = f(\epsilon)$ (рис. 5). Маємо постійне коливання значення середнього коефіцієнту проникності до певних значень деформації, де він зростає у двічі (при $\epsilon = 0,0065; 0,0125$).

$$k(\epsilon) = \sum_{i=0}^5 a_i \cdot \epsilon^i, \quad (2)$$

де
$$a = \begin{pmatrix} 3.45 \times 10^{-12} \\ -5.319 \times 10^{-11} \\ -3.982 \times 10^{-8} \\ 4.452 \times 10^{-5} \\ -7.563 \times 10^{-3} \\ 0.348 \end{pmatrix}.$$

Коефіцієнт детермінації для цієї залежності склав: $R^2 = 0,4472$.

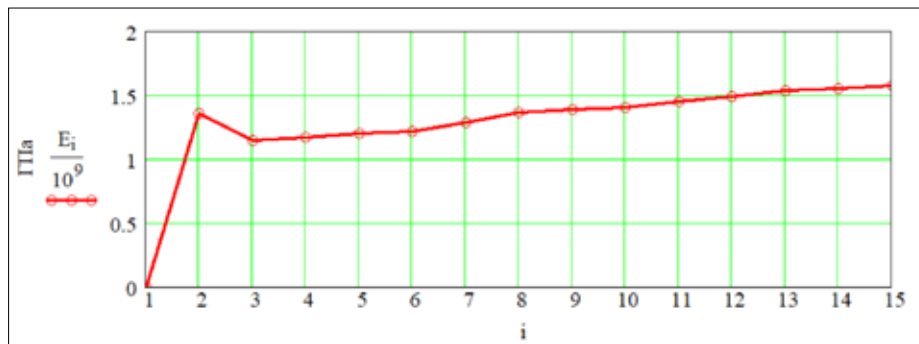


Рис. 4. Модуль пружності зразка пісковику при кожному випробуванні

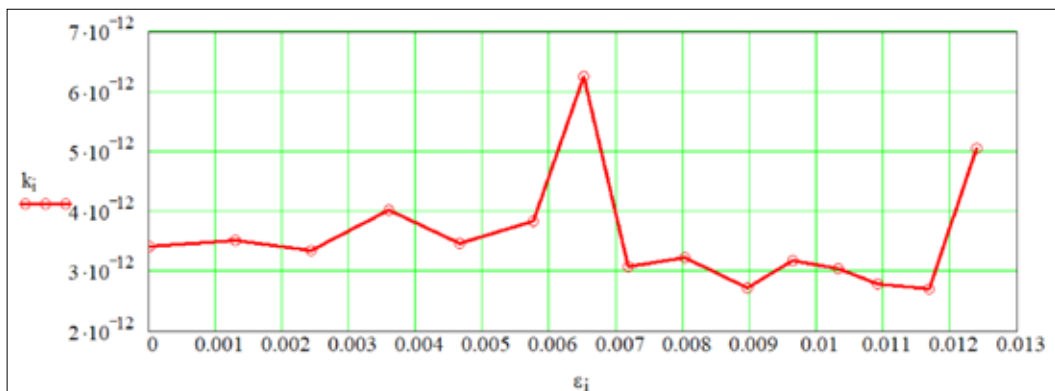


Рис. 5. Зміна середнього коефіцієнту проникності пісковику від деформацій зразка

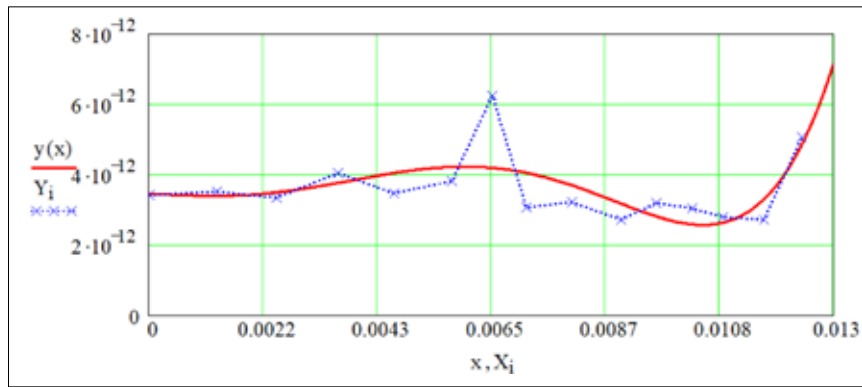


Рис. 6. Апроксимація результатів випробування емпіричною залежністю

Після статистичної обробки даних експерименту отримано емпіричну залежність коефіцієнту проникності від лінійних деформацій середовища (пісковіку) у вигляді поліному 5-го ступеня (рис. 6).

Обговорення результатів. Для практичного використання отриманих результатів лабораторного експерименту були виконані розрахунки чисельного моделювання об'ємного напружено-деформованого стану шаруватого гірського

масиву над виробленим простором за методикою [10]. Отримані деформаційні параметри об'ємної моделі використали у формулі (2) та знайшли зміну коефіцієнту проникності пісковіку основної покрівлі в залежності від його напружено-деформованого стану. Таким чином, були отримані ділянки або зони з підвищеною фільтраційною здібністю у пісковіку основної покрівлі (табл. 1).

Таблиця 1

Ізолінії лінійних деформацій та зон підвищеної фільтрації газу в пісковіку основної покрівлі (відхід лави від монтажного хідника 80 м, довжина лави 300 м)

По висоті шару ($h_{ш} = 15 \text{ м}$)	Лінійна деформація ϵ_x	Зони підвищеної фільтрації
$h_{ш}$		
$\frac{1}{2} h_{ш}$		
$0 h_{ш}$		

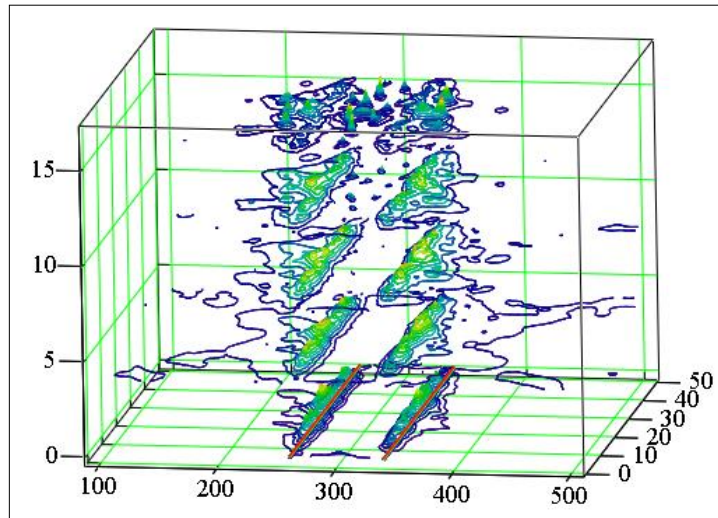


Рис. 7. Зони підвищеної фільтрації в пісковикі основної покрівлі над виробленим простором з розподілом по висоті породного шару $h_m = 15$ м (розмір виробленого простору $80 \times (50 \times 6 = 300)$ м)

Якщо перенести ці зони на кожний перетин породного шару, то отримаємо розподіл зон підвищеної фільтрації у пісковикі основної покрівлі (рис. 7). Як показали дослідження в пісковикі міститься більше газу ніж у пластах-супутниках. Таким чином, дегазація масиву повинна проводитися також для пісковиків великої потужності.

Висновки:

1. Лабораторними дослідженнями встановлена залежність коефіцієнту проникності піско-

вику від лінійних деформацій, яка має хвилеподібний характер.

2. Отримано емпіричну залежність коефіцієнту проникності пісковикі від лінійних деформацій зразка $k(\epsilon) = f(\epsilon)$ у вигляді поліному 5 ступеня.

3. Отримані результати дослідження мають практичну значимість у можливості прогнозування зони підвищеної фільтрації у гірському масиві.

Список літератури:

1. Круковська В.В., Круковський О.П., Кочерга В.М., Костриця А.О. Моделювання зв'язаних процесів деформування порід і фільтрації газу для підвищення безпеки у вугільних шахтах. *Modern innovations and promising ways of development of culture and science : The XXXI International Scientific and Practical Conference. August 09-12, 2022, Boston, USA.* P. 251–257.
2. Алексеев А.Д. Фізика вугілля та гірничих процесів : монографія / А.Д. Алексеев ; НАНУ, Інститут фізики гірничих процесів. Київ : Наукова думка, 2010. 424 с.
3. Шевельов Г.А., Перепелиця В.Г. Фільтрація газу в шахтах. Київ : Наукова думка, 2010. 296 с.
4. Шашенко О.М., Чередник В.А. Оцінка газової проникності породного масиву під час видобутку метану у вугільних шахтах. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* 2020. Випуск 1 (120).
5. Садовенко І. О., Тимошук В. І., Тішков В. В. та ін. Дослідження впливу напружено-деформованого стану вміщуючих гірських порід на їх фільтраційні властивості при підземній газифікації вугільних пластів в умовах Донбасу. *Науковий вісник НГУ.* 2010. № 3. С. 32–33.
6. Пат. № 108627 Україна МПК Е 21 F 5/00 Стенд визначення рідинних та фільтраційних характеристик зразків гірських порід / О. О. Усов, М. Я. Трохимець, О.С. Мінеєв та ін. З-ка u201600642, від 27.01.16. 6 с.
7. Лабораторні дослідження двовимірної фільтрації води через вугільні зразки / О.А. Усов, С.П. Мінеєв, Р.А. Дякун, Ю.Є. Поляков, Н.Я. Трохимець, А.С. Янжула, В.П. Рудь. *Форум гірників – 2017 : матеріали між нар. конф., 4–7 жовтня 2017 р., м. Дніпро.* Дніпро : Національний гірничий університет, 2017. С. 298–307.
8. Сергієнко О.І., Сергієнко Л.В. Експериментальні дослідження фільтраційних властивостей гірських порід. *Геотехнології і охорона праці у гірничій промисловості : збірник матеріалів конф. КП ДонНТУ.* Донецьк : ООО «Цифрова типографія», 2011. С. 43–47.
9. Сергієнко О.І., Богданов Я.С. Дослідження зміни фільтраційних властивостей гірничого масиву під час проведення очисних робіт. *Геотехнології і охорона праці у гірничій промисловості : зб. матеріалів регіональної науково-практичної конференції / КП ДонНТУ.* Донецьк : ООО «Цифрова типографія», 2013. С. 21–25.

10. Сергієнко О.І., Сергієнко Л.В. Обґрунтування способу прогнозу вивалоутворення порід покрівлі над очисним вибоєм. *Науковий вісник ДонНТУ*. Луцьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2022. № 1 (8)–2 (9). С. 140–151.

Serhiienko A.I., Serhiienko L.V. STUDY OF THE INFLUENCE OF THE DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SANDSTONE ON ITS FILTRATION PROPERTIES

Purpose. Carry out laboratory studies of the influence of deformation characteristics on the filtration parameters of sandstone.

Method. Study of the influence of deformation characteristics on the filtration parameters of sandstone. Laboratory tests of the fluid filtration process through a sandstone sample under uniaxial compression loading. Numerical modeling of the three-dimensional stress-strain state of the mountain massif around the produced space.

Results. The article proposes a methodology for laboratory testing of rock filtration parameters under load. Laboratory studies were conducted to determine the filtration parameters of rocks taking into account their deformation properties. The empirical dependence of the permeability coefficient of a sandstone sample on linear deformations in the form of a fifth degree polynomial was obtained. The results of the numerical modeling of the volumetric stress-strain state with a determined gas permeability coefficient are compared. Zones of methane filtration paths in the sandstone of the main roof have been determined.

Scientific novelty. The dependence of the permeability coefficient on linear deformations of sandstone was obtained for the first time. For the first time, the results of the filtration properties of the sandstone of the main roof above the created space are presented. For the first time, a method of forecasting zones of increased gas saturation in the sandstones of the main roof is presented, taking into account filtration properties and volumetric stress-strain state.

Practical significance. The practical significance lies in predicting possible methane filtration paths in sandstone and zones of free methane accumulation. Determining the location of free methane accumulation zones and obtaining parameters for drilling degassing wells to ensure effective degassing of the mountain massif.

Key words: gas filtration process, gas permeability coefficient, load, numerical simulation, laboratory tests, sandstone, rock massif, volumetric stress-strain state, produced space.