

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ И КОЛЬМАТАЦИИ В ОБВОДНЕННОЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ ПРИ ЕЕ ПОДРАБОТКЕ

В. А. Дрибан, Б. В. Хохлов, Н. А. Дуброва, М. Д. Рожко

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела» (РАНИМИ), г. Донецк, ДНР, РФ

Аннотация: Представлены результаты экспериментов по подработке полигона твердых бытовых отходов. Проведены оценки изменения проницаемости массива горных пород под воздействием подработки, опасности проникновения вредных веществ в горные выработки и возможности заболачивания земной поверхности в мульде сдвижения под полигоном твердых бытовых отходов. На основании выполненного прогноза деформаций земной поверхности определены параметры безопасного ведения горных работ у полигона твердых бытовых отходов.

Ключевые слова: полигон твердых бытовых отходов, горная выработка, приповерхностная зона, подработка, кольматация

Для цитирования: Дрибан В. А., Хохлов Б. В., Дуброва Н. А., Рожко М. Д. Исследование процессов фильтрации и кольматации в обводненной приповерхностной зоне при ее подработке // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 4. С. 15-23. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_4_15_23.

RESEARCH OF FILTRATION AND COLMATATION PROCESSES IN THE WATERED NEAR-SURFACE ZONE DURING MINING UNDER THE EARTH'S SURFACE

V. A. Driban, B. V. Khokhlov, N. A. Dubrova, M. D. Rozhko

«Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying» (RANIMI), Donetsk, DPR, Russian Federation

Abstract: The article describes the results of an experiment on the part-time operation of a solid waste landfill. Estimates of changes in the permeability of the rock mass under the influence of mining, the danger of penetration of harmful substances into the mine workings and the possibility of waterlogging of the earth's surface in the drift under the landfill were carried out. A forecast of deformations of the earth's surface under the landfill during lava mining has been made. Based on the research, the parameters of safe mining operations at the landfill were determined. The methodology proposed in the article can serve as a basis for mining reservoir deposits in similar conditions.

Keywords: solid waste landfill, mining, near-surface zone, part-time work, colmatation

For citation: Driban V. A., Khokhlov B. V., Dubrova N. A., Rozhko M. D. Research of filtration and colmatation processes in the watered near-surface zone during mining under the earth's surface. Mine Surveying and Subsoil Use. 2024;(4):15-23. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_4_15_23.

Введение

Полигоны твердых бытовых отходов (ТБО) представляют собой долговременную опасность для людей и окружающей среды. Негативное воздействие полигонов при обычных условиях эксплуатации достаточно хорошо изучено, но ущерб, который будет нанесен в случае их затопления по ряду причин, трудно оценить. Оценив возможный наибольший ущерб эту проблему можно решить, и на ее основе принимать решение.

В Австрии, например, где с 2005 года прекращена добыча угля, разработана методика оценки потенциальных эко-

логических рисков вымывания и эрозии полигонов ТБО, на основе которой принимается решение об их дальнейшем использовании [1] или санации [2]. Подобный подход в районах с активной добычей полезных ископаемых не применим, так как количество факторов, влияющих на процесс фильтрации и кольматации, учесть сложно, а последствия экологической катастрофы могут быть достаточно тяжелыми. Как пример можно привести аварию на шахте «Александр-Запад» (г. Горловка) в 1989 г. в Горловке, над горными выработками которой расположены могильники химических отходов. В течение шести лет небольшие количества

хлорбензола и фенола с водой просачивались в выработки, после чего произошел прорыв химикатов в шахту. Пострадало около 300 человек, и добыча угля на шахте была остановлена [3].

При многократной подработке фильтрационные свойства обводненного деформируемого массива изменяются, и вредные вещества из полигонов ТБО могут попасть в водоносные горизонты, питающие населенные пункты и горные выработки [3]. Единого решения этой проблемы пока нет. Каждая конкретная ситуация требует отдельного подхода, и поэтому исследования в данном направлении весьма актуальны.

Целью исследования является минимизация рисков проникновения вредных веществ из полигона ТБО в водоносные горизонты питьевой воды и горные выработки при максимальном извлечении запасов угля.

Объект исследования: процессы сдвижения, фильтрации и кольматации в обводненной приповерхностной зоне при ее подработке.

Материал и методы

Для исследования процессов фильтрации, кольматации и разработки модели деформирования и сдвижения в обводненной приповерхностной зоне при подработке земной поверхности был проведен эксперимент на шахте «Павлоградская», где в область сдвижения массива горных пород от работы лавы № 423 пласта $c_4 + c_4^H$ попадает полигон ТБО (рис. 1).

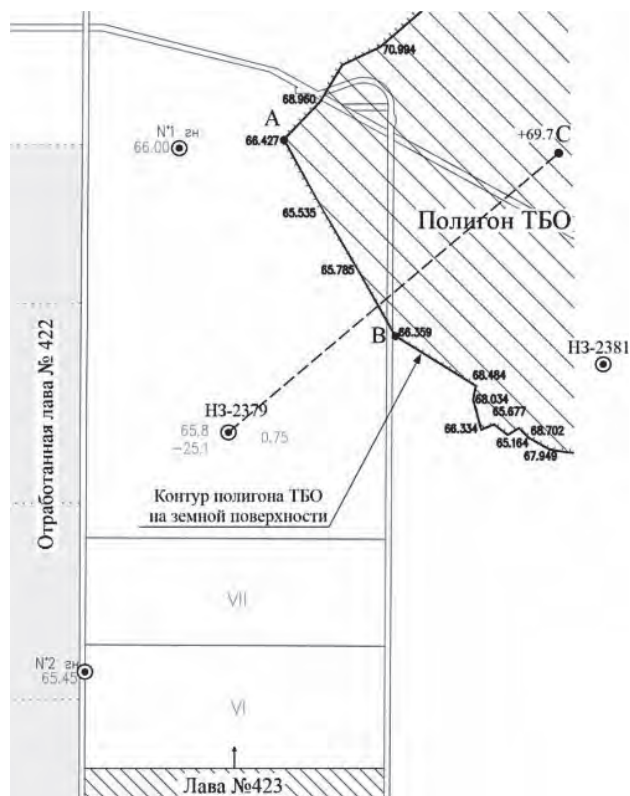


Рис. 1. Выкопировка из плана горных выработок пласта $c_4 + c_4^H$ с поверхностным контуром полигона твердых бытовых отходов

Fig. 1. A copy from the mining plan of the $c_4 + c_4^H$ formation with the surface contour of the landfill

В работе применялся комплексный метод исследования, включающий анализ теоретических и экспериментальных исследований по сдвижению горных пород и содержанию

вредных веществ в воде приповерхностной зоны и в горных выработках.

Ведение очистных работ 423-й лавой по пласту $c_4 + c_4^H$ (рис. 1) производилось в следующих геомеханических условиях:

- средняя глубина отработки — 102 м;
- вынимаемая мощность пласта — 1,05 м;
- угол падения — $1-3^\circ$;
- размеры выемочного участка лавы по линии простирания пласта — 238 м, по линии вкрест простирания пласта — 1 740 м;
- способ управления кровлей — полное обрушение;
- марка угля — Г;
- мощность наносов — 1 м;
- мощность мезозойских отложений — 62 м.

Отработка лавы производилась по восстанию. Среднемесячное подвигание линии очистного забоя составляло 120 м в месяц.

Мощность пород третично-четвертичной толщи на площади поля составляет 60–80 м (рис. 2).

Водоносные горизонты, распространенные на шахтном поле, приурочены к отложениям четвертичного, неогенового, палеогенового, триас-юрского и каменноугольного возрастов. В четвертичных отложениях выделяют два водоносных горизонта: приуроченные к лессовидным суглинкам и в аллювиальных породах долины реки Самары. В этих отложениях постоянно циркулирующих подземных вод не содержится. За счет инфильтрации в низинах они могут насыщаться водой, которая скапливается в песчаных разностях и тонких прослоях песков, содержащихся в суглинках, местами образуя верховодку.

В отложениях неогеновой системы развит водоносный горизонт, заключенный в песках самарского яруса. Этот горизонт приурочен к разнозернистым пескам, содержащим значительный процент глинистого материала, которые обводнены лишь в нижней части мощностью 3–5 м.

Третичные отложения палеогеновой системы представлены сильно обводненными и обладающими свойствами плывунов бурыми и темно-бурыми глинистыми песками бучакской свиты, известковыми глинами, реже мергелями киевской свиты и значительно обводненными сильно глинистыми песками харьковской свиты. Подземные воды заключены в породах киевско-харьковской и бучакской свит, играют основную роль в обводнении горных выработок шахты на тех площадях, где угольные пласты непосредственно выходят под бучакские пески, обладающие плывунными свойствами. Основной водоносный горизонт — Бучакский, имеющий повсеместное распространение. Высота напора составляет от 15–26 до 43 м, коэффициент фильтрации — от 0,007 до 15 м/сут.

Непосредственное участие в обводнении горных выработок принимают водоносные горизонты, приуроченные к отложениям каменноугольного возраста. Водосодержащими породами являются песчаники, известняки и пласты угля. Аргиллиты характеризуются относительно низкой прочностью, что свидетельствует об их слабой литификации, эти породы склонны к набуханию и размоканию в течение 0,5–1 часа. Следовательно, аргиллиты проявляют свойства, присущие глинистым пластичным породам, для которых характерен реологический характер деформирования. В процессе подработки толщи с аргиллитами развитие водопроводящих трещин над выработанным пространством ограничивается в силу проявления кольматационных свойств, смыкания образующихся трещин за счет набухания глинистых пород при разгрузке.

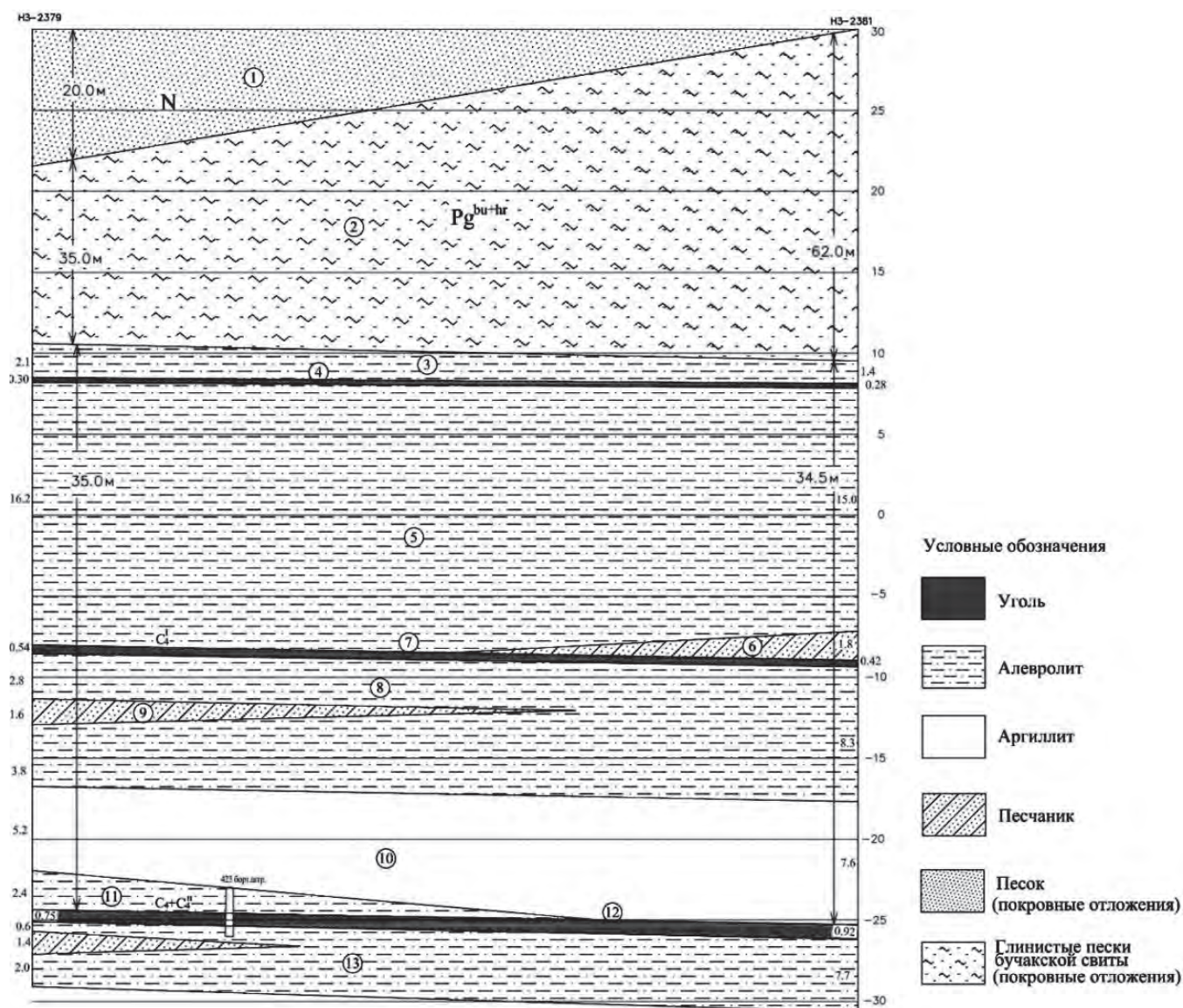


Рис. 2. Геологический разрез по линии скважин H3-2379-H3-2381 (рис. 1)

Fig. 2. Geological section along the line of wells H3-2379-H3-2381 (Fig. 1)

Результаты исследований

Оценка опасности проникновения вредных веществ в горные выработки

Согласно «Правилам...» [4, 5], перед подработкой мест захоронения промышленных отходов следует производить прогноз опасных зон возможного проникновения вредных веществ в горные выработки. Безопасную глубину разработки одного пласта под подобными объектами определяют в соответствии с [4, 5], в наших условиях безопасная глубина составляет 40 м при фактической глубине разработки 102 м, то есть в данном случае проникновение вредных веществ в горные выработки исключено.

Оценка возможности заболачивания земной поверхности в мульде сдвижения под полигоном технических бытовых отходов

Опасность заболачивания земной поверхности и последующего проникновения вредных веществ в нижние водоносные горизонты и горные выработки из водного объекта, образовавшегося на дне мульды сдвижения, возникает при выполнении двух главных условий:

— мульда сдвижения после подработки земной поверхности с учетом ее первоначального рельефа образует вогнутую форму в виде впадины, где может скапливаться вода;

— уровень верховодки находится выше уровня этой впадины, постоянно подпитывая этот вновь образовавшийся на земной поверхности водный объект.

Характер залегания четвертичных отложений на рассматриваемом участке не предполагает образования верховодки, поэтому анализ второго фактора не требуется. Однако даже в отсутствии постоянного источника водной подпитки в виде верховодки остается возможность наполнения образовавшейся впадины атмосферными осадками. Учитывая факт, что четвертичные отложения имеют повсеместное распространение и представлены лёссовидными суглинками и красно-бурыми глинами, можно дать прогноз: вероятность появления такого водоема незначительна, но все же существует.

Расчеты, выполненные согласно [4, 5], показали, что при отработке пласта $c_4 + c_4^H$ лавой № 423 на земной поверхности ожидается образование плоского дна мульды сдвижения.

Вид графиков абсолютных отметок земной поверхности по контуру (рис. 3) и вкrest контура полигона (рис. 4) указывает на то, что уклон земной поверхности при ее подработке увеличивается, что исключает образование на земной поверхности в районе полигона ТБО какого-либо водного объекта.

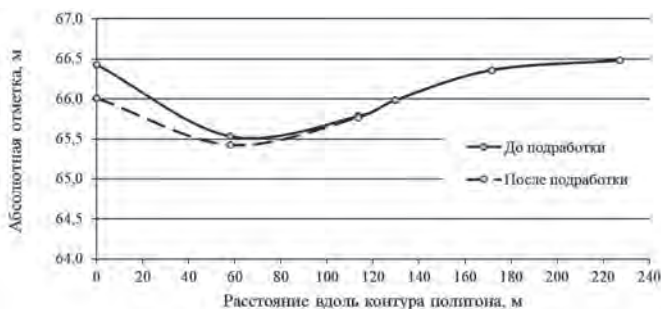


Рис. 3. Абсолютные отметки земной поверхности по линии А-В (см. рис. 1)
Fig. 3. Absolute marks of the Earth's surface along the A-B line (see Fig. 1)

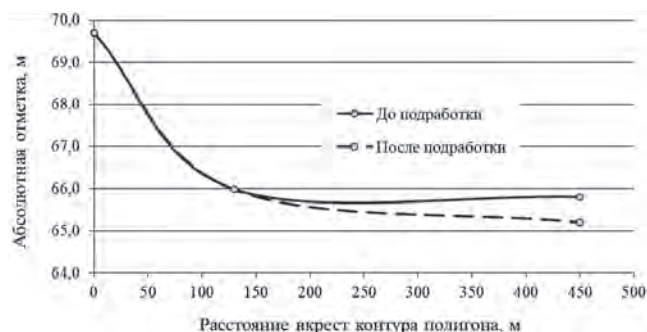


Рис. 4. Абсолютные отметки земной поверхности вкrest контура полигона по линии С-НЗ-2379 (рис. 1)
Fig. 4. Absolute marks of the earth's surface at the intersection of the polygon contour along the line C-H3-2379 (Fig. 1)

Оценка изменения проницаемости массива горных пород под воздействием подработки

Изучение фильтрации в трещиновато-пористых горных породах связано с рассмотрением процессов переноса как в крупных трещинах, так и внутри пористых блоков.

При решении подобных задач для описания линейных процессов обычно используют два вида моделей:

- модель среды с двойной пористостью;
- модель фильтрации с типовым блоком.

Для решения нелинейных задач был использован метод, основанный на моделировании свойств одного из компонентов среды соотношениями наследственного типа [6]. Особенности строения структурных элементов среды, разнообразие законов движения и другие факторы учитываются в предложенной модели с помощью обобщенных кинетических параметров, при таком подходе вмещающие породы рассматриваются как две среды, вложенные одна в другую. Поры и трещины размером от 10^{-6} до 10^{-1} см образуют сложную систему сообщающихся между собой пустот, являющихся транспортными каналами при фильтрации. Геометрические характеристики систем транспортных каналов (густотность, свободный просвет, ориентация и т. д.) определяют важнейшее свойство среды: ее проницаемость.

Еще в 70-е годы прошлого столетия Е. С. Ромм [7, 8] разработал практически универсальную схему получения аналитического выражения проницаемости применительно

к упругой среде с изотропным распределением систем трещин, которая применяется и в современных работах [9, 10].

Для создания аналитической модели проницаемости массива горных пород под воздействием подработки проведен предварительный анализ условий среды.

На первом этапе выбирается некоторая эквивалентная модель среды, структура порового пространства которой соответствует усредненным геометрическим характеристикам порового пространства рассматриваемых типов горных пород. На втором этапе используется какое-либо газо- или гидродинамическое соотношение, связывающее скорость течения флюида в единичном канале $\bar{v}$ с градиентом давления $\bar{\nabla}P$ одним из двух способов. В первом случае соотношения, отражающие характер движения жидкостей и газов, рассматриваются независимо друг от друга, во втором случае используют однотипные соотношения с оговоркой на диапазон удовлетворяющих условий.

Для перехода от скорости течения флюида в отдельных порах к средней скорости фильтрации необходимо отнести его суммарный расход в поперечных к каналам сечениях к единице их площади. При этом скорость фильтрации выражается через скорость течения в единичных трещинах зависимостью Дюпюи – Форхгеймера. Учитывая подобным образом все каналы, в итоге получают линейное соотношение между вектором средней скорости фильтрации и вектором градиента давления, множителем в котором является тензор проницаемости [11, 12].

Тензорный множитель определяет связь между скоростью фильтрации и градиентом давления и представляет по определению тензор проницаемости. Он симметричен, и как всякому симметричному тензору второго ранга ему отвечают три главных направления и три главных значения K_1, K_2, K_3 по этим направлениям.

$$K = \frac{1}{12} \int_{\zeta} a(n) b^2 m_0(n) (\bar{I} - \bar{nn}) dS \quad (1)$$

где K – тензор проницаемости;

a – постоянная, связанная с главным значением тензора проницаемости;

b – ширина раскрытия трещин;

m_0 – постоянная, равная модулю деформации сжатия ϵ_y^e , при которой проницаемость практически равна нулю;

I – единичный тензор;

nn – векторная диада.

Оценка проницаемости при упругом деформировании

При упругом деформировании не происходит образования новых трещин, следовательно, главное значение в изменении проницаемости имеет сжатие и раскрытие первоначальных трещин.

Проницаемость деформируемых горных пород оценивается по формуле

$$K^e = \frac{1}{12} \int_{\zeta} q(n) (1 + \epsilon_m^e / m_0)^3 (I - nn) dS, \quad (2)$$

где $q(n) = a(n) m_0^3(n) L_1^2(n)$ – функция, характеризующая проницаемость K_0 в недеформированном состоянии ($L_1 = b_0(n) + L(n)$),

$L(n)$ – расстояние между стенками смежных трещин;

ϵ_m^e – нормальная к плоскости трещин деформация.

Влияние неравнокомпонентности напряжений нередко с избытком превышает роль начальной анизотропии, что дает

основание в подавляющем большинстве случаев использовать уравнения (1) и (2) при постоянных q и m_0 :

$$K^e = \frac{q}{12} \int_S (1 - \varepsilon_{nm}^e / m_0)^3 (I - nm) dS, \quad K_0 = \pi q / 9. \quad (3)$$

Случаю $a_1 = a_2 = a_3$ отвечает изотропия начального распределения трещин. При этом

$$a_n = M / 2\pi, \quad m_0 = b_0 / (b_0 + L), \quad L_1 = b_0 = L, \quad (4)$$

где M – общее число систем трещин.

Тогда $q(n) = Mb_0^3 / 2\pi (b_0 + L)$ и выражение (3) принимает вид

$$K_0 = Mb_0^3 / 18(b_0 + L). \quad (5)$$

где b_0 – ширина раскрытия трещин;

L – расстояние между стенками смежных трещин.

При преобладании одной системы трещин ($\theta = 0$) для главных составляющих K_1^2 , K_2^2 , K_{01} , K_{02} в плоскости трещин

$$K_1^e = K_2^e = K_{01} (1 - \varepsilon_y^e / m_0^e)^3; \quad K_{01} = K_{02} = q / 12, \quad (6)$$

где q и m – постоянные, обладающие простым физическим смыслом;

q – характеризует проницаемость в разгруженном состоянии;

m – равна модулю деформации сжатия ε_y^e , при которой проницаемость практически равна нулю [12].

Оценка проницаемости при необратимом деформировании

В связи с образованием новых трещин при необратимых деформациях необходим их учет путем введения в функцию плотности распределения систем трещин дополнительного слагаемого $\Delta a(\varepsilon^p)$ в виде набора δ – функций для плоскостей сдвига. Тогда проницаемость

$$K = \frac{1}{12} \int_S [a(\bar{n}) + \Delta a(\varepsilon^p)] L_i^2 (m_0 + \varepsilon_{nm})^3 \times (\bar{I} - \bar{nm}) dS. \quad (7)$$

При чисто упругих деформациях $\varepsilon^p = 0$ и $\Delta a(\varepsilon^p) = 0$, а при $\varepsilon^p = 0$ формула (7) разбивается на два слагаемых: K^e – отвечает упругим деформациям, а K^p – необратимым.

$$K = K^e + K^p. \quad (8)$$

При этом

$$K^p = \frac{1}{12} \sum_r L_{ri}^2 (\varepsilon_{mi}^p)^3 (\bar{I} - \bar{nm}), \quad (9)$$

где i – индекс системы плоскостей скольжения с нормалью n ;

r – число таких систем;

L_{ij} – расстояние между трещинами в i -й системе.

Иными словами, формула (9) дает искомую связь основной фильтрационной характеристики горных пород с характеристиками напряженно-деформированного состояния массива. Таким образом, для предварительных оценок изменения проницаемости вмещающих горных пород под воздействием запредельных деформаций будем использовать формулу (9), отражающую влияние необратимых деформаций на изменение проницаемости K^p деформируемых горных пород в случае конечного числа трещин.

На основании вышесказанного и используя формулу

(5) как базовую, оценим изменение проницаемости горных пород, обладающих различной естественной пористостью и трещиноватостью под воздействием предельных и запредельных деформаций растяжения.

Для этого были проведены расчеты, целью которых являлось установление характера изменения проницаемости горных пород, обладающих различной исходной природной пористостью, под воздействием запредельных деформаций. Необходимо подчеркнуть, что в данном случае оценивается влияние «больших» (предельных и запредельных) деформаций, многократно превышающих пределы прочности горных пород и ведущих к их разрушению.

В качестве основного фактора, определяющего изменение проницаемости, рассматривается влияние деформаций растяжения как наиболее значимых для разрушения горных пород [13–15].

Суть расчетов заключается в поэтапном пересчете величины проницаемости горных пород различной начальной трещиноватости после воздействия деформаций предельных и запредельных значений, локализующихся в единичную трещину. Таким образом, формула (5) примет вид

$$K_0 = \frac{M}{18} \cdot \frac{b_0^3}{(b_0 + L)} + \frac{M}{18} \cdot \frac{b_{e0}^3}{(b_{e0} + L_{e0})}, \quad (11)$$

где b_{e0} – ширина раскрытия единичной наибольшей трещины;

L_{e0} – расстояние между стенками смежных трещин (характеризует плотность возникновения «зияющих» трещин).

На рис. 5 и 6 приведены графики изменения проницаемости горных пород с различной начальной густотностью трещин при 5 и 10 % пористости в зависимости от величины деформаций растяжения.

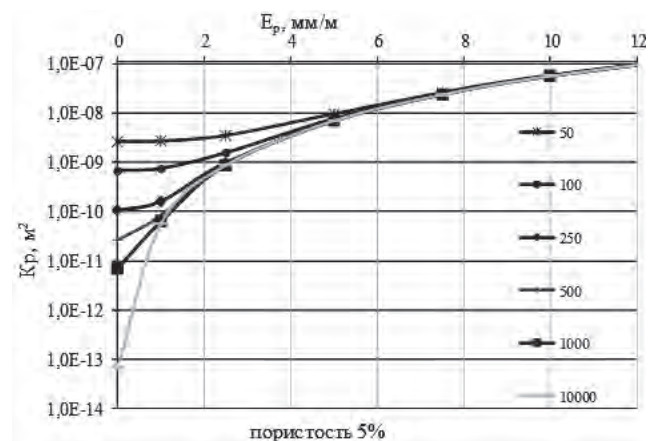


Рис. 5. Изменение проницаемости горных пород пористостью 5 % с различной начальной густотностью трещин и единичной плотностью трещин разрыва

Fig. 5. Change in the permeability of rocks with a porosity of 5 % with different initial crack densities and single crack densities

Согласно данным исследований РАНИМИ, проведенным в разные годы [13–15], где были изучены водно-физические свойства покровных отложений на основании испытаний проб, отобранных при бурении контрольно-разведочных скважин на полях ряда шахт Западного Донбасса, коэффициент фильтрации пород Бучакского водоносного горизонта отличается довольно широкой вариабельностью и изменяется от 0,005 до 0,625 м/ч.

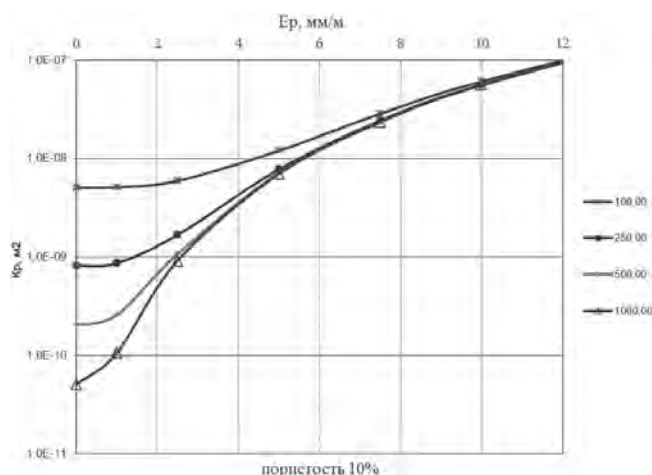


Рис. 6. Изменение проницаемости горных пород пористостью 10 % с различной начальной густотностью трещин и единичной плотностью трещины разрыва

Fig. 6. Change in the permeability of rocks with a porosity of 10 % with different initial crack densities and single fracture crack densities

Таким образом, коэффициент фильтрации достигает значений 0,017 см/сек, что, согласно классификации водопроницаемости горных пород по Н. А. Плотникову, соответствует III–II группе – проницаемые и хорошо проницаемые породы. С учетом высокой изменчивости проницаемость пород Бучакского водоносного горизонта находится в пределах 10^{-12} – 10^{-10} м².

Следующим обстоятельством, которое необходимо учитывать при оценке экологических последствий деформирования горного массива при подработке, это интенсивность кольматационных процессов.

Результаты исследований РАНИМИ, показывают, что отложения бучакской свиты залегают на размытой поверхности карбона и представлены кварцевыми мелкозернистыми глинистыми песками с довольно слабой водоотдачей. При этом нижележащие аргиллиты характеризуются низкой прочностью, нарушением генетической слоистости, перематостью и наличием поверхностей скольжения. Эти породы склонны к набуханию и размоканию в течение 0,5–1 часа [16–18]. Следовательно, аргиллиты проявляют свойства, присущие глинистым пластичным породам, для которых характерен реологический характер деформирования. Дополнительно, согласно данным, представленным шахтой, по лавам – аналогам 421 и 425 при первичной посадке кровли происходило усиленное поступление воды с притоком 15–25 м³/ч, но при стабилизации приток уменьшился и составил 5–10 м³/ч.

Исходя из вышесказанного можно утверждать, что в изучаемых условиях имеет место высокая интенсивность кольматационных процессов. При этом за счет кольматации проницаемость массива уменьшается в пять раз и более.

Прогноз деформаций земной поверхности под полигоном твердых бытовых отходов при отработке 423-й лавы пласта $c_4 + c_4^n$

В зону влияния 423-й лавы $c_4 + c_4^n$ попадает полигон бытовых отходов, допустимость подработки которой следует определять по прогнозу сдвижений и деформаций земной поверхности, выполненному на основании [4, 5, 19].

В процессе отработки объект оказывается в зонах полного сдвижения и перегибов, образующихся в результате

зависания и прогиба породных слоев над выработанным пространством. Сдвигения и деформации земной поверхности на рассматриваемом участке 423-й лавы не будут суммироваться с соответствующими их величинами от соседней отработанной 425-й лавы потому, что разница во времени отработки этих лав превышает продолжительность процесса сдвижения от 425-й лавы. Зона же активизации процесса сдвижения от 425-й лавы находится вне исследуемого участка и поэтому не рассматривается.

Результаты расчетов показали следующее. Максимальная величина оседаний земной поверхности составляет 838 мм, с учетом коэффициента перегрузки – 1005 мм. Распределение оседаний на искомом участке представлено на диаграмме (рис. 7) (см. цветную вклейку на стр. 43).

Расчеты проведены в условной системе координат [4, 5, 20], в которой за 0 принят центр 423-й лавы. Как видно из представленной диаграммы рис. 7, большая часть мульды сдвижения представлена плоским дном. Однако с учетом небольшой глубины подработки большая часть горизонтальных деформаций растяжения реализуется в пределах малых значений полу мульды сдвижения и поэтому намного превышает допустимые величины [21–23]. Диаграмма ожидаемых горизонтальных деформаций при полной отработке лавы по направлению простирания пласта представлена на рис. 8 (см. цветную вклейку на стр. 43).

Прогноз сдвижений и деформаций земной поверхности на рассматриваемом участке, показал, что расчетные деформации, превышающие допустимые горизонтальные деформации земной поверхности 2 мм/м могут возникать на расстоянии в плане менее 34 м от контура очистной выработки. Поэтому для проведения эксперимента лава должна быть остановлена на расстоянии 34 м от контура полигона ТБО в плане (рис. 9).

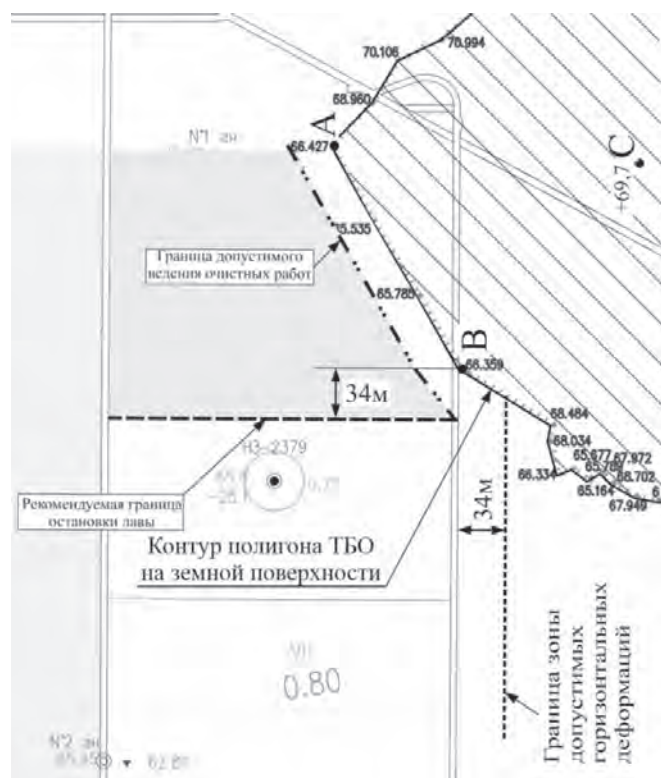


Рис. 9. Схема отработки 423-й лавы при движении вдоль границы допустимого ведения очистных работ

Fig. 9. The scheme of mining the 423rd lava when moving along the boundary of permissible cleaning operations

Заключение

Совместный анализ результатов расчетов изменения проницаемости массива горных пород и численных оценок кольтмационных процессов [16–18] позволяет сделать следующие выводы:

При деформациях растяжения массива до 2 мм/м (рис. 5 и 6) его проницаемость с учетом кольтмации увеличится не более чем в 2–4 раза, что не окажет существенного влияния на протекание фильтрационных процессов и с точки зрения экологической безопасности допустимо.

При увеличении деформаций 4 мм/м и более изменение проницаемости будет носить интенсивный характер: увеличится в 20–100 раз, что приведет к кардинальному изменению геофильтрационных характеристик массива.

При учете очень высоких градиентов полей деформаций при подработке, что в первую очередь связано с малой глубиной отработки пласта $c_4 + c_4^H$, параметры очистной выработки следует выбирать таким образом, чтобы деформации земной поверхности не превышали величину 2 мм/м.

Проведение эксперимента осуществлялось при постоянном контроле водопритоков в горные выработки и анализа воды на загрязнители. Учитывая результаты прогноза сдви-

жений и деформаций земной поверхности в районе полигона ТБО, отработка 423-й лавой пласта $c_4 + c_4^H$ осуществлялась по рекомендуемой границе остановки лавы (рис. 9). Оработка оставшейся части столба осуществлялась постепенным уменьшением линии очистного забоя, двигаясь вдоль границы допустимого ведения очистных работ (рис. 9). С целью снижения степени геомеханического воздействия деформирующегося массива горных пород на земную поверхность было рекомендовано вести отработку лавы безостановочно с постоянной скоростью подвигания очистного забоя 120 м в месяц.

Проникновение вредных веществ из полигона ТБО в горные выработки исключено, так как фактическая глубина разработки 102 м превышает безопасную глубину подработки, которая составляет 40 м.

На земной поверхности в процессе подработки в районе полигона ТБО не происходило застоя воды и осадков потому, что уклон земной поверхности направлен в сторону от полигона.

Фактические горизонтальные деформации земной поверхности по контуру полигона ТБО не превысили 2 мм/м.

Анализ воды из скважин показал, что все показатели по загрязнителям не превышают допустимых норм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Laner, D. Flooding of municipal solid waste landfills—an environmental hazard / D. Laner, J. Fellner, P. Brunner // Science of The Total Environment. — 2009. — Vol. 407, № 12. — P. 3674–3680.
2. Hrad, M. Performance and completion assessment of an in-situ aerated municipal solid waste landfill — Final scientific documentation of an Austrian case study / M. Hrad, M. Huber-Humer // Waste Management. — 2017. — Vol. 63. — P. 397–409.
3. Дуброва, Н. А. Оценка изменения фильтрационных свойств деформируемого массива в результате многократной подработки / Н. А. Дуброва // Вісник КрНУ. — 2014. — Т. 1, № 84. — С. 96–106.
4. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. — СПб.: ВНИИ, 1998. — 291 с.
5. ГСТУ 101.00159226.001-2003. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом. Введ. 28.11.03. — Донецк: УкрНИИ, 2003. — 128 с.
6. Линьков, А. М. Об источниках наследственного типа в задачах переноса / А. М. Линьков, Е. Д. Ходырев // ДАН СССР. — 1988. — Т. 302, № 2. — С. 280–283.
7. Ромм, Е. С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород / Е. С. Ромм. — М.: Недра, 1966. — 282 с.
8. Ромм, Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород / Е. С. Ромм. — Л.: Недра, 1985. — 240 с.
9. Стулов, П. А. Современные технологии создания модели порового пространства горных пород / П. А. Стулов, А. А. Егоров, Т. В. Гавриленко // Вестник кибернетики. — 2019. — № 1 (33). — С. 47–54.
10. Маляренко, А. М. Методическое обоснование достоверности определения фильтрационно-емкостных свойств и структуры порового пространства неоднородных глинизированных коллекторов: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук / А. М. Маляренко. — Уфа, 2021. — 24 с.
11. Бабелло, В. А. Развитие методов оценки физико-механических свойств горных пород в массиве для геомеханического обеспечения открытой угледобычи: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Бабелло. — М., 2010. — 35 с.
12. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов / И. М. Петухов, А. М. Линьков, В. С. Сидоров [и др.]. — М.: Недра, 1992. — 256 с.
13. Кулибаба, С. Б. Оценка влияния очистных выработок на технические скважины / С. Б. Кулибаба, Б. В. Хохлов // Уголь Украины. — 2004. — № 9. — С. 26–27.
14. Хохлов, Б. В. Рациональное ведение очистных работ в зонах влияния на технические скважины / Б. В. Хохлов, С. Б. Кулибаба // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-геологічна: зб. наук. пр. — Донецьк, 2009. — № 5. — С. 316–326.
15. Хохлов, Б. В. О прогнозе сдвижений и деформаций околоствольного массива в зоне влияния очистных работ на вентиляционный ствол № 2 шахты «Терновская» при наличии обводненного слоя горных пород / Б. В. Хохлов, М. Д. Рожко // Труды РАНИМИ: сб. науч. тр. — Донецк, 2023. — № 23 (38). — С. 21–26.
16. Гараева, А. Н. Особенности кольтмации порового пространства в напряженно-деформируемых глинистых коллекторах / А. Н. Гараева, Э. А. Королев, М. Г. Храмченков // Нефтяное хозяйство. — 2017. — № 8 — С. 72–74.
17. Тиаб, Д. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов / Д. Тиаб, Э. Ч. Доналдсон; пер. с англ. М. Д. Углова; под ред. В. И. Петерсилье, Г. А. Белёвского. — 2-е доп. изд. — М.: Премиум Инжиниринг, 2009. — 838 с.
18. Структура фильтрационной кривой и способы ее аппроксимации: Часть 3: Уравнения для аппроксимации фильтрационной кривой / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2021. — Т. 27, № 3. — С. 401–414.
19. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах: Руководящий документ / РАНИМИ; Утв. Мин. угля и энергетики ДНР 15.04.21. — Донецк, 2021. — 267 с.
20. Дрибан, В. А. Трансформация геологической среды в угледобывающих регионах / В. А. Дрибан, Н. А. Дуброва // Экологические аспекты горного и перерабатывающего производства: мат.-лы VII науч.-техн. конф. — М.: ВНИПИПромтехнологии, 2022. — С. 102–112.

21. Гавриленко, Ю. Н. Основные принципы моделирования сдвижений и деформаций земной поверхности методом конечных элементов / Ю. Н. Гавриленко, А. Г. Петрушин // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-геологічна. — Донецьк, 2003. — Вип. 62. — С. 100–114.
22. Дрибан, В. А. Влияние обводненности массива горных пород вокруг выработок на НДС при подземной разработке угольных пластов в пространственной постановке задачи / В. А. Дрибан, А. Г. Петрушин // Труды РАНМИ: сб. науч. тр. — Донецк, 2022. — № 18–19 (33–34). — С. 39–81.
23. Усанов, С. В. Мониторинг трансформации структуры горного массива под влиянием процесса сдвижения / С. В. Усанов, В. В. Мельник, А. Л. Замятин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — Новосибирск: изд-во Сиб. отд. РАН, 2013. — № 6. — С. 83–89.

REFERENCES

- Laner D, Fellner J, Brunner PH. Flooding of municipal solid waste landfills-an environmental hazard. Science of The Total Environment. 2009;407(12):3674–3680.
- Hrad M, Huber-Humer M. Performance and completion assessment of an in-situ aerated municipal solid waste landfill — Final scientific documentation of an Austrian case study. Waste Management. 2017;63:397–409.
- Dubrova N. A. Assessment of changes in the filtration properties of a deformable array as a result of multiple sidework. Bulletin of Kremenchug National University. 2014;1:96–106 (In Russ.).
- Rules for the protection of structures and natural objects from the harmful effects of underground mining in coal deposits. St. Petersburg, 1998 (In Russ.).
- SSU 101.00159226.001 — 2003. Rules for undermining buildings, structures and natural objects in the course of underground coal mining. Intr. 01.01.2004. Donetsk, 2004 (In Russ.).
- Linkov AM, Khidyrev ED. On the sources of hereditary type in transfer problems. DAN USSR. 1988;302(2):280–83 (In Russ.).
- Romm ES. Filtration properties of fractured rocks. Moscow: Nedra, 1966 (In Russ.).
- Romm ES. Structural models of the pore space of rocks. Leningrad: Nedra, 1985 (In Russ.).
- Stulov PA, Egorov AA, Gavrilenko TV. Modern technologies for creating a model of the pore space of rocks. Bulletin of Cybernetics. 2019;1(33):47–54 (In Russ.).
- Malyarenko AM. Methodological substantiation of the reliability of determining the filtration-capacitance properties and structure of the pore space of heterogeneous clay reservoirs. Ufa, 2021 (In Russ.).
- Babello VA. The development of methods for assessing the physical and mechanical properties of rocks in the massif for geomechanical support of open-pit coal mining: abstract. Moscow, 2010 (In Russ.).
- Petukhov IM, Linkov AM, Sidorov et al. Computational methods in the mechanics of rock impacts and emissions: a reference guide. Moscow, 1992 (In Russ.).
- Kulibaba SB, Khokhlov BV. Assessment of the impact of treatment workings on technical wells. Coal of Ukraine. 2004;9:26–7 (In Russ.).
- Khokhlov BV, Kulibaba SB. Rational management of cleaning operations in the zones of influence on technical Wells. Scientific works of Donetsk National Technical University. Mining and geological series. 2009;5:316–26 (In Russ.).
- Khokhlov BV, Rozhko MD. On the forecast of displacements and deformations of the near-barreled massif in the zone of influence of cleaning works on the ventilation shaft No. 2 of the Ternovskaya mine in the presence of a watered layer of rocks. Proceedings of RANIMI: collection of scientific tr. 2023;23(38):21–6 (In Russ.).
- Garaeva AN, Korolev EA, Khramachenkov MG. Features of pore space colmatation in stress-deformable clay reservoirs. Oil industry. 2017;8:72–4 (In Russ.).
- Tiab D, Donaldson E C. Petrophysics: theory and practice of studying the reservoir properties of rocks and the movement of reservoir fluids. Moscow, 2009 (In Russ.).
- Merentsov NA, Balashov VA, Golovanchikov et al. The structure of the filtration curve and methods of its approximation. Part 3. Equations for approximating the filtration curve. Bulletin of the Tambov State Technical University. 2021;27(3):401–14 (In Russ.).
- Location, protection and maintenance of mine workings during mining of coal seams in mines. Guidance document. Approved by the Ministry coal and energy of the DPR 04/15.21. — Donetsk, 2021 (In Russ.).
- Driban VA, Dubrova NA. Transformation of the geological environment in coal-mining regions. Ecological aspects of mining and processing productions. Moscow, 2022:102–12 (In Russ.).
- Gavrilenko YuN, Petrushin AG. Basic principles of modeling displacements and deformations of the Earth's surface by the finite element method. Naukovi prati DonNTU. 2003;62:100–14 (In Russ.).
- Driban VA, Petrushin AG. The influence of the waterlogging of the rock mass around the workings on VAT during underground mining of coal seams in the spatial formulation of the problem. Proceedings of RANIMI: collection of scientific tr. 2022;18–19 (33–34):39–81 (In Russ.).
- Usanov SV, Melnik VV, Zamyatin AL. Monitoring the transformation of the structure of a mountain range under the influence of the process of displacement. Physico-technical problems of mining. 2013;6:83–9 (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Дрибан Виктор Александрович — доктор технических наук, старший научный сотрудник, и.о. директора Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк, ДНР, РФ, Scopus Author ID 55963516100, e-mail: viktor-driban@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Grishin — Associate Professor, Ph.D. of Engineering Sciences, General Director, Geomechanics Victor A. Driban — Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher, Acting Director of the Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Donetsk, DPR, Russian Federation, Scopus Author ID 55963516100, e-mail: viktor-driban@yandex.ru



Хохлов Борис Валентинович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом горного давления, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк, ДНР, РФ, e-mail: hbv@bk.ru

Boris V. Khokhlov – Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, Head of Rock Pressure Department, Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Donetsk, DPR, Russian Federation, e-mail: hbv@bk.ru



Дуброва Наталья Александровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела гидрогеомеханических исследований и охраны недр, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк, ДНР, РФ, e-mail: dubrovan@mail.ru

Dubrova Natalia Aleksandrovna – Ph. D. (Tech.), Senior Researcher of the Department of Hydrogeomechanical Research and Protection of Mineral Resources, Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Donetsk, DPR, Russian Federation, e-mail: dubrovan@mail.ru.



Рожко Марина Дмитриевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела горного давления, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк, ДНР, РФ, e-mail: mdr6464@mail.ru

Marina D. Rozhko – Ph. D. (Tech.), Senior Researcher of the Department of Mining Pressure, Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Donetsk, DPR, Russian Federation, e-mail: mdr6464@mail.ru

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.