

УДК 622.834:624.131.43
DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-2-42-54

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА УЧАСТКАХ ПОДЗЕМНЫХ РАЗРАБОТОК КАМЕННОУГОЛЬНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ (ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)

© 2018 г. А.В. Мохов¹

Аннотация. Прогнозирование гидрогеологических условий подземной разработки угольных залежей, ее влияния на окружающую среду предполагает выявление проницаемости массива внутри зон водопроводящих трещин сдвижения – основного канала поступления подземных и поверхностных вод в горные выработки. Представления о величине и тенденциях изменения этого параметра противоречивы. Проницаемость надугольных отложений при выемке пологих и наклонных каменноугольных пластов с полным обрушением кровли определена по материалам наблюдений за водопроявлениями в лавах из затопленных выработок на залегающих выше пластах и возникших в ходе сдвижения трещин расслоения, комплексных наблюдений за уровнями подземных вод и температурным режимом подработанного массива в ряде ведущих угледобывающих регионов СНГ. Величина коэффициента фильтрации слоев аргиллитов и алевролитов в направлении нормали к напластованию тяготеет к константе около 0,003 ($\pm 20\%$) м/сутки внутри верхней и средней частей области развития объемнораспределенных водопроводящих трещин, часто на участках крупных разрывных тектонических нарушений и в условиях повторных подработок. Данный эффект отражает регулярность распределения и стабильность раскрытости фильтрующих трещин в кровле слоев глинистых пород, способность элементов массива к саморегуляции сдвижения и напряженно-деформированного состояния, самоорганизации образующихся трещинных структур. Сквозная проницаемость интервалов разреза смешанного состава определяется свойствами слоев глинистых пород. Те же значения векторной проницаемости имеют слои глинистого состава над лавой сланцевой шахты (Ленинградское месторождение) и аргиллитоподобных глин в мульде естественного сдвижения над карстовыми полостями (Мещёрская низменность). Эти параллели указывают на общность закономерностей смещения пород на месторождениях твердых пластовых полезных ископаемых, отсутствие связи регулярного поведения горного массива с организуемым действием технологических процессов. Аппроксимация ряда гидродинамических параметров породных тел дает априорную информацию о будущих характеристиках проницаемости горного массива на участках очистных работ.

Ключевые слова: каменноугольные месторождения, подземная разработка, водопроницаемость, сдвижение, водопроводящие трещины сдвижения.

TRANSFORMATION OF ROCK PERMEABILITY AT THE UNDERGROUND MINING AREAS OF HARD COAL DEPOSITS (GEOMECHANICAL ASPECTS)

A.V. Mokhov¹

Abstract. Forecasting of hydrogeological conditions of underground mining of coal deposits, its affect on the environment, presupposes exposure of the mass permeability inside the zones of water-conductive subsidence cracks – main channel of the underground and surface waters income into the mine workings. The notions about value and change tendencies of this parameter are contradictory. The permeability of supra-coal deposits at the excavation of gently sloping and inclined hard coal beds with full roof caving is determined by

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: mochov@ssc-ras.ru

materials of observations over water manifestations in the longwalls from the flooded workings at the lying above beds and arising in the course of subsidence foliation cracks, complex observation of underground waters levels and temperature conditions of the underworked mass in a number of leading coal-mining regions of the CIS. The value of filtration coefficient of the argillites and aleurolites layers in the direction normal to bedding tend toward the constant about 0,003 ($\pm 20\%$) m/day inside of upper and middle parts of the development field of distributed water-conductive cracks, often at the areas of large disjunctives and in conditions of repeated underworking. Given effect reflects regularity of distribution and stability of openness of the filtering cracks in the roof of clayey rock beds, capability of the mass elements to the self-regulation of subsidence and stress-strain state, self-organisation of the formed cracks structures. The through permeability of the cross-section intervals of mixed composition is determined by the properties of clayey rock layers. The layers of clayey composition above the shales mine longwall (Leningrad deposit) and argillite-like clays in the natural subsidence trough above karst hollows (Meshchora lowland) have the same values of vector permeability. These parallels point to the community of regularities of rock displacements at the deposits of hard stratified minerals, absence of connection of the regular behavior of the rock mass with the organizing action of technologic processes. The attractiveness of a number of hydrodynamic parameters of rock bodies gives an a priori information about future characteristics of rock mass permeability at the areas of longwall mining.

Keywords: coal deposits, underground mining, water permeability, subsidence, water-conductive subsidence cracks.

ВВЕДЕНИЕ

Проницаемость горных пород на участках подземных разработок угольных залежей находится под сильным влиянием техногенных факторов, среди которых значительную, нередко определяющую роль играют геомеханические процессы, прежде всего сдвижение. Его следствием является динамизм фильтрационной структуры и флюидопроводимости крупных областей углевмещающих и покровных отложений.

Малопроницаемые в естественном залегании, особенно вдоль нормали к напластованию, или водоупорные скальные и полускальные породы способны приобретать высокие коллекторские свойства в результате появления сообщающихся пустот большой раскрытости. Протекающая параллельно гравитационная консолидация ранее осевших частей массива вызывает здесь частичную редукцию пустотности, коллекторских свойств и фильтрационной структуры. Дополнительный вклад в эти процессы вносит повышенное горное давление. Максимальные текущие и остаточные преобразования массива характерны для участков очистной выемки.

Сведения о вторичной проницаемости пород служат основой для решения различных прикладных задач, включая такие остроактуальные, как оценка ожидаемых условий подработки и обеспечение охраны водных объектов, прогноз экологических последствий ликвидации шахт. Особое значе-

ние имеет выявление свойств зон водопроводящих трещин сдвижения (ЗВТС), обрамляющих выработанное пространство (ВП) и сообщающихся с ним гидравлически. ЗВТС над ВП может иметь высоту в сотни метров и распространяться в покровные отложения. В условиях некрутого залегания развитие водопроводящих трещин в почве выработок незначительно. Эти зоны служат путями поступления подземных и поверхностных вод в выработки, превращаются в каналы водовыделений из затопленных шахт.

Известны многочисленные случаи подработки водных объектов, приведшие к прорыву воды в шахту по трещинам сдвижения, что дает основания заключить о весьма высокой проницаемости разделяющего массива. Достаточным условием прорыва или поступления недопустимого по величине притока в выработки считается распространение ЗВТС до водного объекта (положения руководящего документа [1]), что отражает традиционные представления о резком увеличении фильтрационных свойств скальных и полускальных пород над ВП, особенно при повторных подработках.

В то же время имеется большой положительный опыт выемки угля под скоплениями воды в недрах и на поверхности в обстановке поступления в выработки незначительного притока по ЗВТС (такие сведения приведены, например, в работах [2–4]), что указывает на возможность сохранения внутри зоны малопроницаемых областей.

По результатам экспериментов на эквивалент-

ных материалах с флюидоконтролем сотрудниками Всесоюзного научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ) разработана остающаяся до настоящего времени единственной математическая модель проницаемости массива внутри ЗВТС над ВП [2]. Согласно данным моделирования, происходит нарастание коэффициента фильтрации пород вниз к основанию подработанной толщи по логарифмическому закону, то есть по абсолютной величине незначительно и равномерно даже в литологически неоднородном массиве. Надежность модели в практических приложениях низка [5], она не учитывает неодинаковость трансформации породных тел различного состава [1], что указывает на несоответствие формирования трещинной проницаемости в экспериментах натурным процессам.

Таким образом, практика эксплуатации не дает оснований считать картину трансформации реальных горных массивов сдвижением установленной, с приемлемой полнотой и надежностью, что определяет актуальность исследования вопроса.

В этой связи понятна высокая публикационная активность в области изучения факторов формирования притока в горные выработки, прежде всего свойств ЗВТС и решения горно-геомеханических задач в целом. Эти вопросы рассматриваются, например, в работах [6–12] и других публикациях, однако нерешенность многих аспектов проблемы сохраняется. К числу ее причин могут быть отнесены слабая раскрытость механизма трансформации породного массива, доминирование исследований на основе теоретических предпосылок при недооценке значения натурных данных, что предопределяет низкую обоснованность ряда выводов.

Прямые определения проницаемости с помощью таких традиционных методов, как откачки, наливов, нагнетания, пластоиспытания не представляют большой ценности для реальных, сильно неоднородных по многим свойствам толщ горных пород. Более надежным способом могут считаться часто применяемые опытные разработки угля вблизи водных объектов с определением фильтрационных характеристик и фильтрационной структуры массива на основе анализа материалов шахтной документации выработок [3].

Настоящая статья посвящена исследованию водопроницаемости массива надугольных отложений вдоль нормали к напластованию на участках выемки пологих и наклонных каменноугольных пластов лавами с полным обрушением кровли.

Характеристики проницаемости получены автором по материалам наблюдений геологических служб шахт за водопроявлениями в лавах из затопленных выработанных пространств (далее – затопленных выработок) на залегающих выше пластах и созданных сдвижением трещин расслоения, а также выполненных специализированной организацией (ВНИМИ) натурных исследований подработанных массивов геофизическими методами.

Обработка натурных данных произведена с использованием разработанных автором методов логико-математического моделирования фильтрации подземных вод и трещинообразования в подработанном горном массиве.

Изменения проницаемости охватывают часть вмещающего угольную залежь горного массива. Они связаны с нарушениями сплошности различных морфолого-генетических групп, имеющими вполне стабильную локализацию по отношению к ВП.

Образующееся на месте вынутаго пласта пустотное пространство имеет согласно залегающую с угленосной толщей решетчато-ячеистую структуру, осложненную секущими выработками.

При выемке средних по мощности и мощных пластов в результате обрушения пород в ВП и непосредственно над ним образуется трещинно-кавернозный коллектор. Коллекторские свойства свежесобрушенных пород любого состава исключительно высоки, однако в дальнейшем в процессе слеживания минеральной массы многократно снижаются.

В толще вмещающих пород возникает деформационная структура из отдельных страт – переслаивание непроницаемых и большего по сравнению с естественным залеганием количества высокопроницаемых горизонтов, гидравлически обособленных или соединенных между собой новыми гидрогеологическими окнами, включая трещины и другие деформации сдвижения [13; 14].

Водопроводящие деформации сдвижения концентрируются над ВП. Над его краевыми частями могут развиваться на высоту до 20–30 м секущие насквозь слои трещины обреза большой раскрытости и проницаемости – техногенные аналоги полостей вдоль сместителей сбросов. В расположенной над ВП области прогиба массива формируются дислокации сдвижения трещинного типа. В области значительного изгиба слоев развиты трещины вдоль и параллельно (в частности трещины расслоения) напластованию, нормально к нему (торцевые трещины различных систем). Текущая и остаточная

объемная (скалярная) и векторная вдоль напластования или по нормали к нему проницаемость определяется свойствами систем вполне равномерно рассеянных в массиве, названных нами в этой связи объемнораспределенными, трещин и может в ходе и по завершению активной стадии сдвижения быть и сохраняться высокой, особенно в плане. Большая протяженность, раскрытость и водопроницаемость характерны для полостей раскрывающихся по сместителям разрывных нарушений в любой части массива, включая покровные отложения. Область распространения объемнораспределенных водопроницающих трещин сдвижения (ОВТС) нередко достигает высоты многих десятков метров, занимая обычно основную по объему часть ЗВТС. Вне ЗВТС трещины сдвижения часто недолгоживущи, нередко имеют тупиковый характер и своим появлением влияния на гидрогеологические условия в генерировавших их забоях непосредственно не оказывают, однако создают возможность усиления перетоков воды вдоль напластования [13; 14].

Текущему приращению проницаемости некоторой области сопутствует ее уменьшение в других частях массива в ходе самоуплотнения. Дальнейшие изменения происходят под влиянием суперпозиции факторов различного знака и природы, прежде всего физико-химического и механического воздействия воды, ее потоков.

Рассматриваемую схему подработки затопленных выработок и трещин расслоения в разрезе иллюстрирует рисунок 1.

ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА ПО МАТЕРИАЛАМ ВОДОПРОЯВЛЕНИЙ В ЛАВАХ ИЗ ЗАТОПЛЕННЫХ ВЫРАБОТОК

Определение водопроницаемости произведено по результатам анализа 15 случаев перетоков воды из подработанных затопленных выработок на 9 шахтах различных регионов бывшего СССР в условиях пологого и полого-наклонного залегания с использованием логико-математического моделирования на основе фундаментальных гидрогеологических закономерностей.

По данным геологических служб шахт, очистные работы велись на глубине до 480 м от поверхности длинными забоями. Площадь участков подработки варьировалась от 1700 до 458000 м², высота водяного столба в затопленных выработках над центральной частью участка – от 0,1 до 25 м. Основной до-

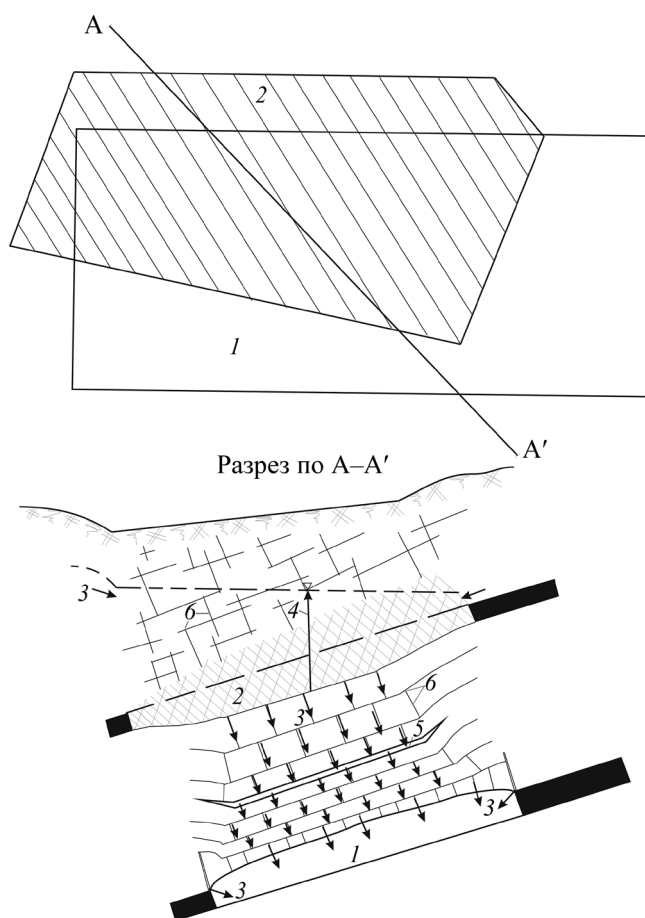


Рис. 1. Схема перетока шахтных вод из затопленной выработки на вышележащем пласте в подработавшую лаву в плане и разрезе: 1 – выработанное пространство; 2 – затопленная выработка; 3 – потоки воды; 4 – высота водяного столба в затопленной выработке; 5 – трещина (полость) расслоения; 6 – водопроницающие объемнораспределенные трещины сдвижения.

Fig. 1. Diagram of mine waters interflow from a flooded working at overlying bed into the underworking longwall, plan and cross-section: 1 – gob; 2 – flooded working; 3 – water flows; 4 – height of water column in the flooded working; 5 – crack (cavity) of lamination; 6 – volume distributed water-conducting subsidence cracks.

полнительный к фоновому приток из этих водных объектов (в объеме от 2 до 250 м³/ч) поступал в обрушенное пространство действующих лав.

Разделяющие массивы (в данных ситуациях – междупластья) сложены типичным для угленосных толщ комплексом полускальных и скальных пород (песчаники, алевролиты, аргиллиты, в ряде случаев – известняки, конгломераты и угли), имеют мощность от 16 до 160 м. Содержание глинистых пород варьируется от 28 до 89 %. Кратность подработки подземных водных объектов – от 15 до 48; за исключением случая 15 подработки были первичными. Глинистые породы слагают почву затопленного ВП (кроме случая 3), в разрезе междупластья

Таблица 1. Параметры подработок водных объектов, сопоставление прогнозных и фактических значений перетоков воды и коэффициентов фильтрации разделяющего массива

Table 1. Parameters of water objects undermining, comparison of forecasted and actual values of water interflows and filtration coefficients of the separating mass

Случай подработки, № Case of undermine, or. nos.	Вынутая мощность m , м / Мощность разделяющего массива M , м Thickness of excavated layer m , m / Thickness of separating mass, M , m	Средняя кратность подработки / Содержание аргиллитов и алевролитов в разделяющем массиве, % Average ratio of undermining / Content of argillaceous and sitstones in separating mass, %	Общая площадь подработки водного объекта F , 1000 м ² Total undermined area beneath water object F , 1000 m ²	Высота водного столба в водном объекте над центральной частью участка подработки H_{cp} , м Water column height in water object above central part of undermined area H_{av} , m	Водоприток в подработавшую лаву из водного объекта Q , м ³ /ч / Water influx to the undermining longwall from water object Q , m ³ /h	Коэффициент фильтрации разделяющей толщи по нормали к напластованию фактический без учёта структуры и оседания основания объекта и угла падения слоев / с учетом $k_{вф}$ м/сутки / Coefficient of hydraulic conductivity of separating series normal to bedding ignoring / considering structure and settling of the object base and dip angle k_{vf} m/day	Коэффициент фильтрации разделяющего массива по нормали к напластованию $k_{вф}$, м/сутки (по [2]) * / Приток из водного объекта прогнозный Q_n , м ³ /ч, (по [2]) ** / Coefficient of hydraulic conductivity of separating series normal to bedding, k_{vf} m/day (by [2]) * / Inflow from water object forecasted Q_n , m ³ /h (by [2]) **
1	1,1 / 16	15 / 74	10,6	4,5	~6	0,0027 / 0,0023	0,566 / 307
2	2,0 / 76–83	40 / 89	138	~14	до (up to) 200	0,0025 / 0,0023	0,024 / 158
3	свыше (beyond) 1,6 / 64	40 / 61	8,2	~25	~60	0,0074 / до (up to) 0,0047	0,061 / 28
4	3,2 / 18	8 / 37	7,7	~20	до (up to) 50	до (up to) 0,0081 / до (up to) 0,0075	0,953 / 562
5	2,2 / 62	28/ 28-61	13	14	20–22	0,0028 / 0,0027	0,157–0,251 / 105–163
6	2,3 / 50	22 / 41	7	17	18	0,0036 / 0,0036	0,248 / 127
7	2,8 / 60	21 / 63	2,9	2,5	3	0,0049 / 0,0038	0,254 / 28
8	2,0–2,4 / 75	33 / 60	115	16	250	0,0033 / 0,0031	0,131 / 702
9	1,85 / 44	24 / 45	92	7,5	100–110	0,0037 / 0,0030	0,337 / 1278
10	2,05 / 44	21 / 45	69	5	50	0,0035 / 0,0025	0,375 / 1154
11	1,6 / 33	21 / 40	50	5	39	0,0026 / 0,0021	0,454 / 1045
12	2,0 / 64	32 / 45	6	15	5	0,0014 / 0,0013	0,186 / 55
13	2,45 / 75	31 / 60	458	0,1	50	0,0024 / 0,0025	0,155 / 2842
14	до (up to) 2,3 / 47	20 / 38	1,7	8	~2	0,0034 / 0,0030	0,370 / 29
15	3,2 / 155	48 / 72	75	5	12	0,0007 / 0,0006	0 / 0
16	1,7 / 36	21 / 21	6	4	4	0,004 / 0,0027	0,425 / не определялся (undefined)
17	2,9 / 60	21 / 58	3,2	59	до (up to) 30	до (up to) 0,0038 / до (up to) 0,004	0,344 / не определялся (undefined)

Примечание / Note. * – по формуле / according to formula $k_{вф} = lq \frac{H_T - 3m}{M - 3m}$; ** – для условного совпадения площади перетока и подработки водного объекта по формуле / for conditional coincidence of the areas of interflow and undermining of water object according to formula $Q_n = 0,04F(1 + \frac{H_{cp}}{M})lq \frac{H_T - 3m}{M - 3m}$.

в основном представлены слоями мощностью 3 м и более. Степень постдиагенетических преобразований пород варьируется от средней до высокой и характеризуется марками вмещаемых углей ОС, Т в Центральном Донбассе (случаи подработок 1–3), ЗБ в Челябинском бассейне (случай 4), Г на Буланашском месторождении (случаи 5, 6), ДГ, Г в Кузбассе (случаи 7–15). Тектоническая нарушенность междупластий невелика, за исключением двух случаев (2 и 12) размещения водного объекта на висячем крыле крупного взброса.

Сведения о составе и структуре междупластий, вынудой мощности, величине притока до подработок и к ее концу, других параметрах природно-технической ситуации приведены в таблице 1. На рисунке 2 изображены литологические колонки разделяющих массивов (за исключением случая 12).

Анализ материалов подработок показал, что дополнительные водопроявления начинаются после захода забоя под затопленный контур, как исключение – при определенном приближении к нему (случай 3). Характерное приращение притока после очередного цикла осадки кровли в условиях слабой естественной обводненности и проницаемости междупластий свидетельствует о поступлении воды по новообразованным трещинам сдвижения, а не по каналам природного происхождения. Для случаев 9 и 11 зафиксирована связь интенсивности перетока с быстрым расширением или сокращением площади подработанного водного объекта.

Принципиальная схема движения шахтных вод из затопленных выработок к подработавшему ВП по ОВТС представлена на рисунке 1.

Натурные данные указывают на прямую пропорциональность величины перетока в лавы площади подработки затопленных выработок и глубине водного объекта в них. Эти факты имеют естественное объяснение: высота водяного столба характеризует давление воды на контур разгрузки, следовательно, величину гидравлического градиента напора, а площадь подработки определяет сечение фильтрационного потока. Таким образом, эти данные свидетельствуют о соответствии перетока закону фильтрации Дарси.

Выявленное совпадение численного значения градиента и выраженной в метрах высоты водяного столба (случаи 1, 2, 4–15) связано с гидравлическим разрывом потока на глубине около 1 м в глинистой непосредственной почве затопленных выработок (принято ~1,1 м), где развивается в ходе сдвижения трещина расслоения [5].

В подобной обстановке действующее значение напорного градиента J может быть в условиях наклонного залегания слоев и движения воды вдоль нормали к напластованию рассчитано по формуле:

$$J = \frac{(H_{\text{ср}} + \beta) \cos \alpha}{\beta},$$

где $H_{\text{ср}}$ – средневзвешенная высота водяного столба в затопленных выработках на участке подработки, м; α – угол падения слоев; β – мощность области полной потери напора нисходящего фильтрационного потока, равная 1,1 м.

Отсюда оценка коэффициента фильтрации разделяющего массива вдоль нормали к напластованию $k_{\text{вф}}$ с учетом сделанных заключений может быть в первом приближении произведена по формуле, предложенной в работе [5]:

$$k_{\text{вф}} \approx \frac{\beta Q}{F (H_{\text{ср}} + \beta) \cos \alpha}, \quad (1)$$

где Q – водоприток из водного объекта; F – площадь участка разгрузки водного объекта.

Результаты расчета $k_{\text{вф}}$ для условий совпадения участков разгрузки и подработки без учета оседания основания водного объекта представлены в таблице 1.

Сопоставление результатов показывает, что для всех случаев величина $k_{\text{вф}}$ имеет один порядок, а в десяти из них (1, 2, 5, 6, 8–11, 13, 14) – с учетом обычной погрешности определения около 20 % – практически совпадает, составляя от 0,0025 до 0,0039 м/сутки, то есть в среднем около 0,003 м/сутки.

Случаи 12 и особенно 15 характеризуются при этом относительно низким, а 3, 4, 7 – напротив, повышенным значением проницаемости. Эти отклонения предопределены особенностями взаимного размещения дренирующей лавы и водного объекта, а также различием структуры междупластия.

В случае 15 отличие $k_{\text{вф}}$ от типового значения в меньшую сторону предопределено значительной мощностью разделяющей толщи. К тому же результату привело (случай 12) размещение затопленных выработок над периферийной частью участка разработки на висячем крыле взброса, что обеспечило меньшую вовлеченность данного источника обводнения в сдвижение и существенное превышение площади подработки над площадью перетекания. Ход горных работ и различные косвенные данные указывают на тяготение разгрузки водного объекта к участку полных сдвижений его основания [5], размеры которого убывают вверх от разрабатываемого

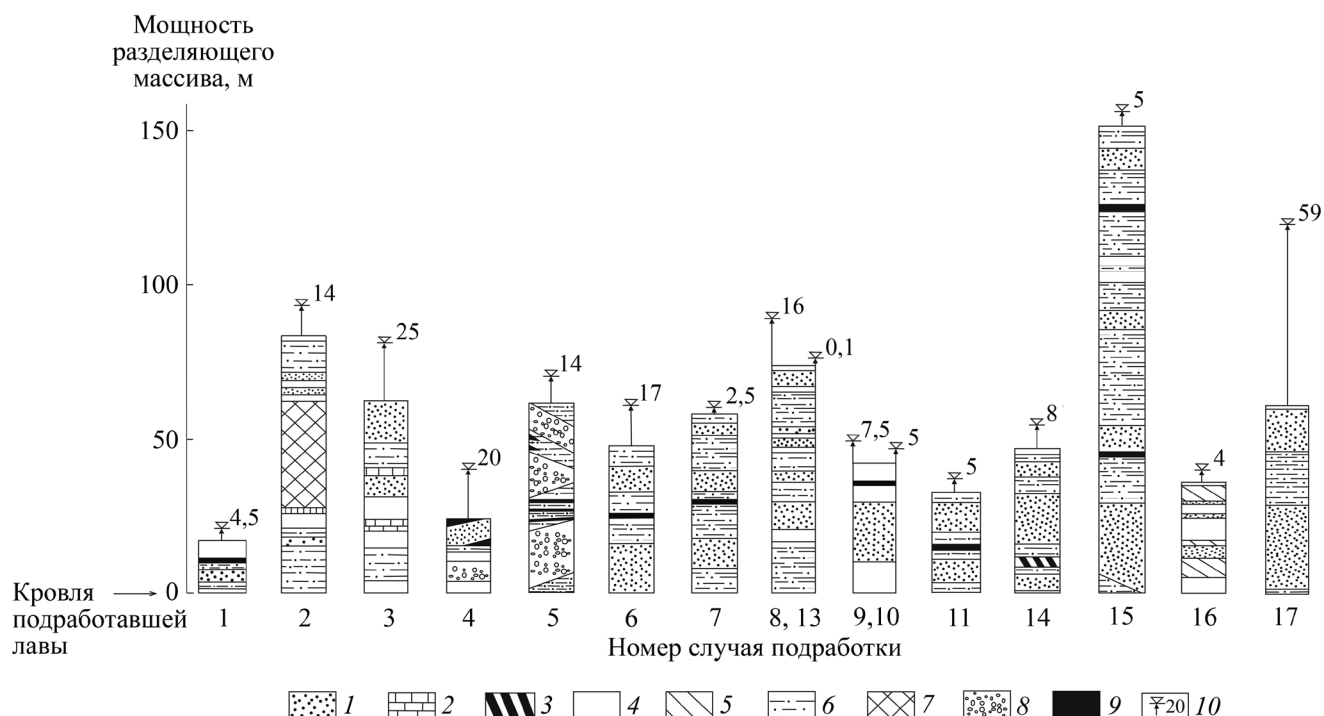


Рис. 2. Литологические колонки массивов, разделяющих водные объекты и подработавшие лавы: 1 – песчаник; 2 – известняк; 3 – углистый аргиллит; 4 – аргиллит; 5 – переслаивание глинистых пород; 6 – алевролит; 7 – перемятые породы; 8 – конгломерат; 9 – уголь; 10 – напор воды на кровлю разделяющего массива и его средняя величина, метров водяного столба.

Fig. 2. Lithologic column of masses separating water objects and underworking longwalls: 1 – sandstone; 2 – limestone; 3 – coaly argillite; 4 – argillite; 5 – interbedding of clayey rocks; 6 – aleurolite; 7 – crumpled rocks; 8 – conglomerate; 9 – coal; 10 – water head at the roof of separating mass and its mean value, meters of water column.

мого пласта. Таким образом, причина низких значений $k_{\text{вф}}$ связана с использованием неверной посылки о равновеликости и тождественности участка разгрузки и общей площади подработки водного объекта. Соответственно, расчеты по общей площади ведут к занижению фильтрационных свойств. Они позволяют получить вполне точную оценку проницаемости только при малой мощности междупластья и при весьма значительной по размерам подработке, как в случае 13.

Результаты расчета для случая 13, когда высота водяного столба минимальна и градиент напора заведомо мало отличается от единицы, подтверждают правомерность выводов о действующем значении градиента, трещинной структуре массива и, следовательно, величине проницаемости. Об этом свидетельствует также совпадение расчетных значений $k_{\text{вф}}$ для случаев 8 и 13 перетоков на соседних участках из водного объекта на одном и том же пласте в условиях резко различающейся его средней глубины (16 и 0,1 м).

Повышенные значения проницаемости в случаях 4 и 7 обусловлены, по-видимому, вскрытием водного объекта нижней частью ЗВТС ближе к кон-

такту растрескавшихся пород с зоной обрушения, имеющих, соответственно, относительно более высокие фильтрационные свойства.

Высокие значения $k_{\text{вф}}$ для случая 3 связаны с особенностями структуры разделяющего массива в непосредственном основании водного объекта. Влияние данного фактора проявилось в поступлении дополнительного притока при приближении забоя на расстояние 50–60 м к границе затопленных выработок по простиранию, что указывает на превращение в водопроводящий канал и заводнение пачки песчаников непосредственной почвы и вхождение пачки в состав подрабатываемого водоисточника. Гидравлическое объединение вызвало рост давления воды на контур разгрузки – намного менее проницаемый слой алевролита в почве песчаников, – на величину его мощности и, соответственно, увеличение фактического градиента напора потока, что не было учтено в проведенном расчете.

Если учесть влияние данного структурного фактора на градиент напора, то расчетное значение $k_{\text{вф}}$ уменьшится до 0,0047 м/сутки. Дополнительный учет фактического превышения площади перетока над площадью подработки собственно затопленных

выработок дает величину 0,0028 м/сутки, совпадающую с характерным значением проницаемости.

Результаты пересчета $k_{\text{вф}}$ с учетом вероятного оседания почвы водного объекта (на 0,7–1,5 м в рассматриваемых случаях) приведены в таблице 1. Расчет параметра для случаев 5, 6, 8, 9, 10 и 11 с учетом также теоретической величины площади полных сдвижений нижнего контура участка затопления (оценена для этих случаев на основе справочных данных об углах полных сдвижений и представляется вполне надежной) дает следующие результаты: 0,0030, 0,0027, 0,0052, 0,0038, 0,0034 и 0,0022 м/сутки соответственно, при среднем значении около 0,0035 м/сутки. Можно констатировать близость пересчитанных и сделанных ранее оценок $k_{\text{вф}}$, что является доводом в пользу их объективности и правомерности использованного методического подхода. Величина $k_{\text{вф}}$ варьируется здесь возле некоторой константы.

Как можно судить по типологии и объему притока, величине вынудой мощности, рассмотренные случаи 1, 2, 3, 5, 6, 7–15 характеризуют условия вскрытия затопленных выработок верхней или средней по высоте частью ОБТС.

Такое совпадение служит подтверждением правильности фильтрационной схематизации и показывает необходимость учета структуры разделяющей толщи и трансформации обстановки, в частности изменений границ, конфигурации, площади подземного водного объекта, глубины и гидростатического давления воды на его нижний контур.

ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПО МАТЕРИАЛАМ ВОДОПРОЯВЛЕНИЙ В ЛАВАХ ИЗ ТРЕЩИН (ПОЛОСТЕЙ) РАССЛОЕНИЯ

Трещины (полости) расслоения формируются на контакте в разной степени осевших над забоем лавы и позади него частей массива до их обрушения и могут стать аккумуляторами воды. В гидравлическом отношении эти водные объекты тождественны затопленным выработкам, подземным и поверхностным водоемам и водотокам. Принципиальная схема перетока воды из трещин расслоения в выработанное пространство изображена на рисунке 1.

Оценка водопроницаемости произведена по материалам наблюдений за притоком в лавы из них на двух шахтах Кузбасса. Информация о параметрах природно-технической обстановки приведена в

таблице 1 и на рисунке 2 (случаи 16 и 17). Расчет $k_{\text{вф}}$ выполнен с использованием формулы (1).

Значения этого параметра без учета оседания нижней поверхности трещины составляют от 0,004 до 0,0038, с учетом – от 0,0027 до 0,004 м/сутки для случаев 16 и 17 соответственно (табл. 1), характеризую свойства породной среды песчано-глинистого состава в разрезе средней – нижней частей области ОБТС.

Полученные результаты характеризуют свойства разделяющего массива в течение активной стадии сдвижения. Отметим близость оценок для обоих рассмотренных случаев.

ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Появление ЗВТС инициирует движение подземных вод сквозь утратившие водоупорные свойства слои к горным выработкам.

Определение фильтрационных свойств на участках таких перетоков выполнено по результатам комплексных наблюдений ВНИМИ за уровнями подземных вод и температурным режимом массива типичного состава и структуры в условиях неоднократной подработки в двух крупных угледобывающих регионах [15–17].

Изучение нисходящего перетока на одной из шахт Кузбасса произведено в интервале глубин 150–210 м после выемки третьего, нижнего, угольного пласта свиты (вынутая мощность 1,8 м) на глубине до 350 м. Кратность последней подработки основания интервала исследований составила 78, двух предыдущих двумя пластами – 41 и 54 (вынутая мощность 1,8 и 2,2 м соответственно). Степень участия в формировании притока в подрабатывающие лавы затопленных выработок над интервалом исследований не установлена. Согласно расчетам на основе рекомендаций работы [18] и справочных данных о теплофизических характеристиках пород, величина $k_{\text{вф}}$ шести литологически неоднородных частей интервала варьировалась от 0,0005 до 0,005, составляя в среднем 0,001 м/сутки (метрологическая погрешность около 30 %) [15–17]. На глубинах 140 и 150 м она составила 0,005, на глубине 190 м – 0,002 м/сутки. В работах [16; 17] отмечено, что поле температур после тройной подработки осталось в наиболее удаленных от ВП по нижнему пласту интервалах неизменным по сравнению с его состоянием при предшествовавшей второй подработке.

По приведенному в работе [17] графику с результатами наблюдений за тепловым режимом подработанного массива и уровнями подземных вод здесь нами рассчитаны на основе рекомендаций [18] значения $k_{\text{вф}}$ для объекта в Печорском бассейне (Интинская часть). После выемки второго пласта свиты величина данного параметра в интервале глубин 140–170 м составила около 0,001 м/сутки при кратности подработки низа интервала 16 и 28 соответственно.

Согласно работам [15–17] все результаты исследований в обоих бассейнах характеризуют свойства пород над ЗВТС. Поскольку, однако, проницаемость глинистых пород вкрест напластованию вне ЗВТС мало отличается от нуля, перетоки подземных вод в этом направлении здесь практически невозможны, соответственно, результаты измерений следует, по нашему мнению, отнести к данной зоне.

Ближние значения $k_{\text{вф}}$ получены сотрудниками ВНИМИ по результатам термометрических исследований на Шкотовском бурогольном месторождении (Приморье) по описанной выше методике [15; 17; 18]. Основной источник обводнения лав находился в полости между зависшим покровом крепких базальтов и угленосной песчано-глинистой толщей, сложенной механически слабыми породами. Величина $k_{\text{вф}}$ массива составила 0,002 м/сутки. Для объекта весьма характерно поступление в выработки по водопроводящим трещинам больших объемов песка.

В большинстве случаев значения $k_{\text{вф}}$ характеризуют свойства средней и верхней частей области ОВТС над ВП по различным подрабатываемым пластам после завершения активной стадии сдвижения и сопоставимы или близки между собой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение полученных различным путем оценок фильтрационных свойств разделяющих массивов однотипного состава показывает их сопоставимость или – с учетом метрологической погрешности – практически совпадение на всех объектах исследований.

Выявленная близость значений $k_{\text{вф}}$ имеет массовый характер и не может расцениваться как случайная. Действительное значение $k_{\text{вф}}$ может считаться практически константой, равной приблизительно 0,003 м/сутки, то есть соответствующей наиболее надежным оценкам по материалам подработок затопленных выработок.

Отмеченное свойство проницаемости проявляется в условиях широкого спектра мощности, состава и структуры частей массива, кратности их подработки, физико-механических, начальных фильтрационных и иных характеристик горных пород, разнообразия природно-технических обстановок.

Сопоставимость или практически полная неразличимость фильтрационных свойств интервалов разреза может быть признана указанием на наличие на пути потока воды структурных элементов-стабилизаторов данного параметра. Полученные значения $k_{\text{вф}}$ должны быть отнесены к слоям пород с минимальными в сопоставимых обстановках фильтрационными свойствами – аргиллитов и алевролитов [3; 5]. Присутствие или отсутствие угольных пластов, известняков и конгломератов, вариации положения слоев песчаников в разделяющих толщах не оказало существенного влияния на величину $k_{\text{вф}}$, что служит признаком более высокой проницаемости тел этих пород. Случай 3 (по материалам работы [4]) подтверждает правомерность данных выводов, свидетельствуя об опережающем приобретении песчаником на много более высоких фильтрационных свойств по сравнению с подстилающим алевролитом.

Поскольку водные объекты вскрыты различными частями области ОВТС, указанной или близкой величиной $k_{\text{вф}}$ характеризуются здесь, по-видимому, все в разной степени удаленные от ВП и затопленных выработок достаточно мощные слои глинистых пород. Гидравлический разрыв потока внутри такого слоя служит признаком возрастания проницаемости в сторону почвы и необходимости отнесения этой оценки к прикровельной части данного структурного элемента массива [5].

Природа стабилизации сопряжена, очевидно, со свойствами сети торцевых фильтрующих каналов, а именно с формированием систем трещин регулярной структуры и весьма мало различающейся раскрытостью в лимитирующем расход потока сечении, то есть у кровли слоя.

Существование предпосылок образования таких систем подтверждается известной стабильностью шагов периодического обрушения непосредственной и тем более основной кровли лав, трансляционным перемещением контуров мульды сдвижения земной поверхности над лавами. Другой комплекс данных: симметричность формы области полных сдвижений, отсутствие здесь существенных горизонтальных перемещений, заметного растяжения и

сжатия поверхности слоев – указывает на наличие благоприятных условий для генерации равноаскрытых водопроводящих торцевых трещин двух основных субортогональных систем.

Из соображений симметрии представляется наиболее вероятной генерация изометричных ячеек трещин на поверхности как слоя, так и рядов техногенных породных блоков близкой протяженности и высоты внутри него [5].

Полученные значения проницаемости характеризуют свойства как давно осевшего (случаи 9 и 13), так и свежееосевшего массива в конце активной стадии сдвижения, находящегося соответственно во вполне консолидированном или слабо консолидированном состоянии. Отметим, что пропорциональность расхода перетекания площади подработки водного объекта устанавливается достаточно быстро по мере ее расширения. Данное обстоятельство служит указанием на скоротечность формирования водопроводящих свойств глинистых пород вкрест напластованию и асимптотичность сужения торцевых трещин.

Вероятным основным механизмом формирования раскрытости на заключительном этапе можно считать упругое сокращение фрагментов слоя в плане при разгрузке, обладающее малой интенсивностью и асимптотической тенденцией и обеспечивающее прямую связь этого параметра с длиной образующих блоков.

Подобный механизм реализуется при оседании массива в виде прогиба с разделением на отдельные пачки слоев и слои, внутри которых трещинообразование протекает вполне автономно.

В реальных условиях правомерно ожидать появления сетей трещин иного размера и рисунка, соответственно, отличающейся раскрытости и протяженности, особенно по мере приближения к генерирующему ВП и нарастания флуктуаций сдвижения.

На основе приведенных данных можно сделать вывод о вполне равномерном распределении проницаемости слоев глинистого состава в направлении нормали к напластованию на контуре разгрузки водного объекта – участке полных сдвижений его основания. Значительная вариабельность размеров блоков обеспечивает повышенную площадную неоднородность распределения $k_{\text{вф}}$. Рост фильтрационных свойств к почве мощных слоев обусловлен в основном вариациями размеров и формы блоков вокруг типичного значения по той же причине [13].

Снижение нарушенности и, как следствие, проницаемости к кровле слоя пород одного и того же литотипа в сторону земной поверхности связано с ростом стационарности трещинообразования и отражает наличие тенденции к саморегуляции сдвижения и деформаций оседающих автономно слоев, пачек слоев и всего подработанного массива.

Материалы наблюдений для случая 13 показывают стабильность величины перетока на протяжении не менее 20 лет. Эти данные, как и рассмотренные материалы по Шкотовскому месторождению, служат признаком фильтрационной устойчивости стенок водопроводящих трещин даже в механически слабых глинистых породах и при больших давлениях воды.

Дифференцированность свойств вещественных компонентов массива, включая покровные отложения, предопределяет чередование здесь страт с различной вторичной текущей и остаточной проницаемостью. Имеется также от слабого и умеренного до сильного прирост проницаемости слоев одной и той же литологической принадлежности в сторону источника возмущения. Распределение фильтрационных свойств в разрезе имеет «пилообразный» характер: максимумы отвечают локализации слоев геомеханически жестких пород (песчаников, конгломератов, известняков). За пределами ЗВТС эти породные тела могут также приобрести высокие коллекторские свойства.

Близость значений $k_{\text{вф}}$ в случаях 2 и 12 размещения затопленных выработок на висячем крыле крупного взброса и остальных подработок в малонарушенных ситуациях указывает на возможность слабого влияния тектонических дислокаций на трансформацию проницаемости в ходе сдвижения.

Случай 15 демонстрирует возможность сохранения вторичной проницаемости на уровне указанной константы в условиях повторных разработок. Аналогичный вывод может быть сделан при сопоставлении результатов определения проницаемости геофизическими методами на рассмотренных выше объектах в Кузбассе и Печорбассе в условиях второй и третьей подработок массива.

Оценки проницаемости междупластий в рассмотренных ситуациях подработок затопленных выработок с использованием описанной выше логарифмической модели [2] дают среднее расхождение с фактом в 11069 %, частных прогнозов – до 24509 % в сторону завышения. Имеется аналогичное несоответствие модели приведенным выше результатам геофизических работ. Прогноз перетока из затоп-

ленных выработок на основе этой модели (по методике работы [2]) дает среднее отклонение 2037 % (по модулю) (частное – до +5534 %) (таблица 1).

Выводы по результатам моделирования на эквивалентных материалах об отсутствии зависимости проницаемости от литологического состава слоя и ее связи практически только с удаленностью от ВП, как следует из работы [2], не отвечают, таким образом, реальности, поскольку не согласуются с эмпирическими данными, включая рассмотренные.

Отметим, что, по данным термометрии, близкими значениями $k_{\text{вф}}$ (0,007 м/сутки, погрешность оценки около 100 %) характеризуется толща мергелистых известняков на участке очистных работ одной из сланцевых шахт Ленинградского месторождения [19]. По аналогии с угольными объектами эти оценки следует отнести к прослоям глин в известняках внутри ОВТС.

Эти данные свидетельствуют о наличии общих закономерностей трещинообразования при сдвиге пород в условиях месторождений пластовых полезных ископаемых в массивах полускальных и скальных пород.

Обнаруженные эффекты стабилизации проницаемости имеют параллели с гидродинамическими последствиями такого природного процесса, как оседание массива при формировании карстовых нарушений.

Выход вертикальной вторичной проницаемости массива плотных аргиллитоподобных глин на величину 0,002–0,003 м/сутки обнаружен нами в зонах карстовых пликтивных нарушений Мещёрской низменности [20]. Глины слагают здесь верхнюю часть толщи пород в мульде естественного сдвига массива в обширные карстовые полости – фактически аналоги лав на угольных шахтах.

Близость до совпадения оценок $k_{\text{вф}}$ на разных объектах в различных природно-технических ситуациях служит признаком низкой чувствительности трещинообразования к физико-механическим и многим другим свойствам пород, вероятной связи его с некоторой обобщенной характеристикой, которую на текущем этапе исследований целесообразно выражать указанием номенклатуры литотипа. Регулярность водопроводящих трещинных структур показывает, что слои глинистых пород, имеющие различные пустоты и ослабления, способны проявлять себя в ходе сдвига как физически сплошная среда.

Данный факт указывает на общность количественных закономерностей гравитационного сме-

щения пород в рассмотренных однотипных природно-технических ситуациях в области блочного сдвига массива, отсутствие связи регулярного поведения горного массива и выявленных аттракторов с организующим действием технологических процессов.

ВЫВОДЫ

Проницаемость горного массива определяется характером сдвига его областей. Неоднородность деформационных свойств и литологического состава ведет к появлению стратифицированного коллектора, наиболее проницаемые части которого приурочены к низам подработанной толщи, телам песчаников, конгломератов и известняков.

Развиты тенденции снижения скалярной и векторной по нормали к напластованию проницаемости в разрезе отдельных слоев, слоев глинистого (вероятно, и другого) состава и интервалов массива вверх от ВП. Внутри области ОВТС слои глинистых пород обладают склонностью стабилизировать вторичную проницаемость по нормали к напластованию на уровне 0,003 м/сутки в широком диапазоне своих характеристик и горнотехнических показателей эксплуатации. Распределение фильтрующих трещин на участке водопроводящего трещинообразования в слоях глинистых пород имеет вполне регулярный характер. Данные эффекты отражают способность массива и его отдельных геомеханически автономных элементов к саморегуляции сдвига и напряженно-деформированного состояния, самоорганизации образующихся трещинных структур.

Высокая вероятность формирования в слоях глинистых пород регулярных трещинных структур с определенным значением проницаемости служит признаком аттрактивности структурообразования и ряда гидродинамических параметров породных тел, что дает информацию о будущих характеристиках горного массива на участках очистной выемки.

Практическое приложение этих эффектов позволяет повысить качество гидрогеологических прогнозов при подземном освоении твердых пластовых полезных ископаемых без проведения специальных разведочных работ.

Публикация подготовлена в рамках выполнения Госзадания ЮНЦ РАН (тема НИР 00-18-11, № госрегистрации 01201363185).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. 1998. СПб., изд-во ВНИМИ: 291 с.
2. Гвирцман Б.Я., Кацнельсон Н.Н., Бошенятов Е.В., Нестеров Г.А., Самарин В.П. 1977. Безопасная выемка угля под водными объектами. М., Недра: 175 с.
3. Мохов А.В. 2011. Оценка прорывоопасности очистной выемки каменноугольных пластов с обрушением кровли под водными объектами (по материалам подработок затопленных выработок). Горный информационно-аналитический бюллетень. 2: 47–54.
4. Кравченко В.М., Сердула Я.Г. 1958. Выемка угольных пластов пологого падения под затопленными выработками. Промышленно-экономический бюллетень Луганского совнархоза. 5: 41–47.
5. Мохов А.В. 2013. О проницаемости горных пород в зоне сдвижения на каменноугольных месторождениях (по материалам подработок затопленных выработок). Доклады Академии наук. 452(3): 300–302. doi: 10.7868/S0869565213220192
6. Гусев В.Н. 1999. Геомеханика техногенных водопроводящих трещин. СПб., изд-во Санкт-Петербургского горного ин-та: 156 с.
7. Митишова Н.А. 2001. Особенности подработки водных объектов при наличии в толще пород водозащитного слоя. Горный информационно-аналитический бюллетень. 7: 125–128.
8. Садовенко И.А., Рудаков Д.В. 2010. Динамика фильтрационного массопереноса при ведении и свертывании горных работ. Днепрпетровск, изд-во Национального горного университета: 216 с.
9. Рудаков Д.В., Иванова Е.С. 2012. Геомеханическая оценка проницаемости трещиноватых пород вокруг подземных выработок. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2: 49–53.
10. Дуброва Н.А. 2014. Оценка изменения фильтрационных свойств деформируемого массива в результате многократной подработки. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 1: 96–106.
11. Зубков В.В., Зубкова И.А. 2017. Формирование зоны техногенных водопроводящих трещин над очистной выработкой. Международнй научно-исследовательский журнал. 5–2(59): 172–175. doi: 10.23670/IRJ.2017.59.146
12. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Ляшенко В.И. 2017. Методы строительной механики при решении горно-геомеханических задач. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 3: 45–54.
13. Мохов А.В. 2001. О некоторых свойствах зон водопроводящих трещин сдвижения в условиях каменноугольных месторождений. В кн.: Гидрогеология на рубеже веков: межвузовский сборник. Новочеркасск, Набл.: 77–90.
14. Мохов А.В. 2012. Гидродинамическая эволюция пустотного пространства каменноугольных шахт под влиянием затопления. Вестник Южного научного центра. 8(3): 42–49.
15. Леваньков Б.И., Миронов А.С., Норватов Ю.А. 1987. Проведение и интерпретация наблюдений за температур-

ным и гидродинамическим режимом техногенно нарушенного массива для оценки водопритоков в горные выработки. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 3: 97–100.

16. Леваньков Б.И. 1983. Использование наблюдений за изменением теплового поля в подрабатываемом массиве для оценки гидрогеологических условий и деформирования пород кровли очистной выработки. В кн.: Методы и аппаратура в шахтной геологии и геофизике. Л., изд-во ВНИМИ: 62–67.
17. Норватов Ю.А. 1988. Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод (при освоении месторождений полезных ископаемых). Л., Недра: 261 с.
18. Фролов Н.М. 1976. Гидрогеотермия. М., Недра: 280 с.
19. Стрельский Ф.П., Бокий Л.Л., Прохоров А.Д. 1983. Гидрогеологические условия выемки горючих сланцев лавами с обрушением кровли. Уголь. 8: 61–63.
20. Мохов А.В. 2015. К вопросу о проницаемости и фильтрационной структуре зон карстовых нарушений (на примере Мещёрской низменности). Доклады Академии наук. 461(5): 554–557. doi: 10.7868/S086956521511016X

REFERENCES

1. Pravila okhrany sooruzheniy i prirodnnykh ob'ektov ot vrednogo vliyaniya podzemnykh gornnykh razrabotok na ugol'nykh mestorozhdeniyakh. [Regulations of constructions and natural objects protection from harmful influence of underground mining at coal deposits]. 1998. St. Petersburg, All-Russian Science-Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying Publishers: 291 p. (In Russian).
2. Gvirtsman B.Ya., Katsnelson N.N., Boshenyatov E.V., Nesterov G.A., Samarin V.P. 1977. Bezopasnaya vyemka uglya pod vodnymi ob'ektami. [Safe coal extraction beneath water objects]. Moscow, Nedra: 175 p. (In Russian).
3. Mokhov A.V. 2011. [An assessment of water inrush hazard of coal seams extraction with roof caving under water objects (by materials of undermining of flooded workings)]. Mining informational and analytical bulletin. 2: 47–54. (In Russian).
4. Kravchenko V.M., Serdula Ya.G. 1958. [Mining of gentle dipping coal beds beneath flooded workings]. Promyshlennno-ekonomicheskii byulleten' Luganskogo sovnarkhoza. 5: 41–47. (In Russian).
5. Mokhov A.V. 2013. Rock Permeability in Displacement Zones at Coal Deposits: A Case Study of Underworked Inundated Mines. Doklady Earth Sciences. 452(1): 904–906. doi: 10.1134/S1028334X13080035
6. Gusev V.N. 1999. Geomekhanika tekhnogennykh vodoprovodyashchikh treshchin. [Geomechanics of the technogenetic water-conductive cracks]. St. Petersburg Mining Institute Publishers: 156 p. (In Russian).
7. Mitishova N.A. 2001. [Peculiarities of the water objects undermining at presence of water-protective layer in the rock sequence]. Mining informational and analytical bulletin. 7: 125–128. (In Russian).
8. Sadovenko I.A., Rudakov D.V. 2010. Dinamika fil'tratsionnogo massopere-nosa pri vedenii i svertyvanii gornnykh rabot. [Dynamics of the filtration mass-transfer at carrying out and

- curtailment of mining works]. Dnepropetrovsk, National Mining University Publishers: 216 p. (In Russian).
9. Rudakov D.V., Ivanova Ye.S. 2012. [Estimation of fractured rock permeability around excavations from the viewpoint of rock mechanics]. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2: 49–53. (In Russian).
 10. Dubrova N.A. 2014. [Measurement of change of rock mass filtration characteristics in consequence of long-time repeated mining]. *Visnyk Kremenchutskoho Natsionalnoho Universytetu Imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. 1: 96–106. (In Russian).
 11. Zubkov V.V., Zubkova I.A. 2017. [Formation of a technogenic water-conducting crack zone over a stope]. *International Research Journal*. 5–2(59): 172–175. (In Russian). doi: 10.23670/IRJ.2017.59.146
 12. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Liashenko V.I. 2017. [Methods of structural mechanics in solving of mining and geomechanical problems]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 3: 45–54. (In Russian).
 13. Mokhov A.V. 2001. [On some properties of the zones of water-conductive subsidence cracks in condition of hard coal deposits]. In: *Gidrogeologiya na rubezhe vekov: mezhvuzovskiy sbornik*. [Hydrogeology on the brink of ages: interuniversity collection]. Novocherkassk, Nabla: 77–90. (In Russian).
 14. Mokhov A.V. 2012. [Hydrodynamic evolution of the cavity of coal mines under the influence of flooding]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 8(3): 42–49. (In Russian).
 15. Levan'kov B.I., Mironov A.S., Norvatov Yu.A. 1987. [Carrying out and interpretation of observations of the temperature and hydrodynamic regime of technogenously disturbed mass for estimation of water inflows into mining workings]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 3: 97–100. (In Russian).
 16. Levan'kov B.I. 1983. [Using of observations after changes of thermal field in the undermined mass for estimation of hydrogeological conditions and deformation of the roof rocks of second mining workings]. In: *Metody i apparatura v shakhtnoy geologii i geofizike*. [Methods and equipment in mining geology and geophysics]. Leningrad, All-Union Science-Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying Publishers: 62–67. (In Russian).
 17. Norvatov Yu.A. 1988. *Izuchenie i prognoz tekhnogenogo rezhima podzemnykh vod (pri osvoenii mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh)*. [Study and forecasting of technogenous regime of underground waters (at assimilation of mineral deposits)]. Leningrad, Nedra: 261 p. (In Russian).
 18. Frolov N.M. 1976. *Gidrogeotermiya*. [Hydrogeothermy]. Moscow, Nedra: 280 p. (In Russian).
 19. Strel'skiy F.P., Boki'y L.L., Prokhorov A.D. 1983. [Hydrogeological conditions of the oil shales longwall mining with roof caving]. *Ugol'*. 8: 61–63. (In Russian).
 20. Mokhov A.V. 2015. The Problem of Permeability and the Filtration Structure of Karst Disturbance Zones: Evidence from the Meshchera Lowlands. *Doklady Earth Sciences*. 461(2): 330–333. doi: 10.1134/S1028334X15040108

Поступила 26.03.2018