

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ГОРНЫХ ПОРОД НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ И РЕЖИМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА В ОБРУШЕННЫХ ЗОНАХ

Вивчено вплив літологічного складу пористого середовища в обрушених зонах на величину їх аеродинамічного опору. Показано, що основною причиною зміни аеродинамічного опору пористого середовища зони обвалень є процес кольматції що відбувається в її поверхневому шарі. Отримані аеродинамічні характеристики пористого середовища залежно від зміни її літологічного складу, які дозволяють визначати значення параметрів фільтрації для різних умов пористого середовища обрушених зон.

Изучено влияние литологического состава пористой среды в обрушенных зонах на величину их аэродинамического сопротивления. Показано, что основной причиной изменения аэродинамического сопротивления пористой среды зоны обрушений является процесс кольматации происходящий в ее поверхностном слое. Получены аэродинамические характеристики пористой среды в зависимости от изменения ее литологического состава, позволяющие определять значения параметров фильтрации для различных условий пористой среды обрушенных зон.

The influence of lithology porous medium in value pearled areas on their aerodynamic drag. It is shown that the main reason for the change of aerodynamic resistance of the porous medium zone collapses are mudding process that takes place in its surface layer. Obtained aerodynamic characteristics of the porous medium, depending on the changes of lithology, which allow you to define filtering settings for different porous medium milled areas.

Опыт проветривания рудников Кривбасса свидетельствует о значительном влиянии аэродинамически активных зон обрушений на эффективность функционирования вентиляционных систем при добыче руды с глубоких рудников. В этих условиях для правильного решения основных вопросов по повышению эффективности проветривания глубоких рудников важнейшей задачей является достоверная оценка аэродинамических характеристик зон обрушения.

Разрушенная горная масса в различных частях зоны обрушения весьма неоднородна. Так литологический состав поверхностного слоя обрушений, как правило, резко отличается от литологического состава остальной части разрушенной горной массы [1]. Это связано с тем, что в поверхностный слой обычно попадает большее количество глинистого материала из наносов, а в дальнейшем этот слой подвергается активному разрушающему воздействию атмосферных агентов и солнечной радиации. Далее проникновение мелкодисперсных частиц горных пород в поровое пространство более крупной горной породы повышает сопротивление пористой среды. Т.е. при фильтрации жидкости с содержанием мелких взвешенных в ней частиц через пористую среду происходит как бы ее внутреннее засорение, в результате чего уменьшается фильтрационная способность данной пористой среды. Это явление, получившее название кольматации, известно и для некоторых условий в литературе описано [2], однако его влияние на проницаемость пористой среды в обрушенных зонах рудников Кривбасса и на величину их аэродинамического сопротивления в достаточной степени не изучено.

Целью данной публикации является установление закономерностей изменения аэродинамического сопротивления пористой среды в обрушенных зонах рудников Кривбасса вследствие кольтматации их поверхностного слоя.

Процесс кольтматации происходит при взаимодействии дисперсной фазы с дисперсионной средой кольтматирующих растворов, а также поровой поверхности породы с внутрипоровой средой, в результате чего снижается проницаемость пористой среды обрушенных зон, что оказывает существенное влияние на режим фильтрации.

Для оценки влияния литологического состава и физико-механических свойств пород, слагающих пористую среду обрушенной зоны, на ее проницаемость, на аэродинамической модели были проведены исследования режимов фильтрации через пористую среду с добавлением в нее в различных соотношениях глины. Результаты исследований (табл. 1) свидетельствуют о том, что при содержании глины в пористой среде в пределах 5 % в опытных образцах при продувках имел место комбинированный режим фильтрации с показателем режима $n = 1,1-1,15$, а дальнейшее увеличение содержания глины до величины 25 % по объему приводит к уменьшению показателя n и режим становится ламинарным с $n = 1,0$.

На рис. 1 приведены графики зависимости $\lg \Delta P = f(\lg Q)$ для пористой среды с классом крупности – 10 + 8 мм при различном объемном содержании глинистых добавок (5...25 %).

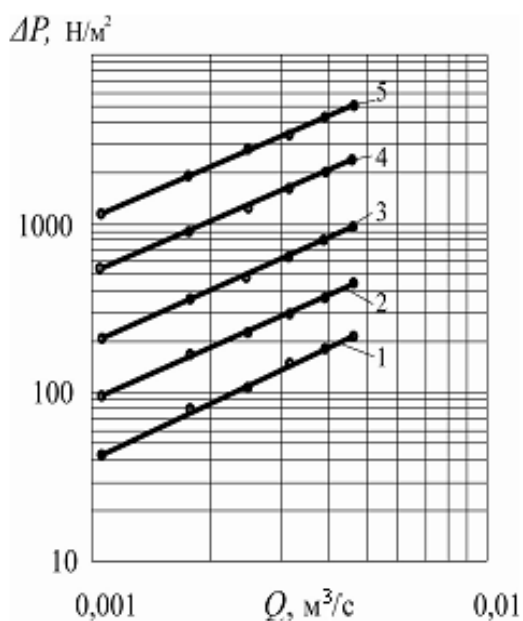


Рис. 1. Графики зависимости ΔP от Q при различном содержании глины в породе класса -10+8 мм: 1 – 5%; 2 – 10%; 3 – 15%; 4 – 20%; 5 – 25%.

Из графиков видно, что содержание глины в пористой среде оказывает значительное влияние на сопротивление пористой среды. Поэтому при поддержании постоянного расхода при продувке фракций пород с содержанием глины значительно повышается давление. Из-за глины сопротивление пористой среды повышается, а размеры поровых каналов имеют пониженные значения.

Таблица 1

Определение параметров режимов движения воздуха в пористой среде
заполненной глиной

Содержание глины, %	Замеренные величины параметров		Величины, определенные на основании замеров				
	Скорость фильтрации v , м/с	Перепад давлений ΔP , Н/м ²	Расход воздуха Q , м ³ /с	n	Коэффициент проницаемости $k_{np} 10^8$, м ²	Re	Сопротивление среды, f
5	0,015	42	0,00106	1,10	0,539	0,07	6,278
	0,025	73	0,00177	1,11	0,517	0,12	3,846
	0,035	106	0,00247	1,12	0,500	0,17	2,798
	0,045	141	0,00318	1,14	0,482	0,21	2,214
	0,055	178	0,00389	1,15	0,467	0,25	1,841
	0,065	215	0,00459		0,457	0,3	1,575
10	0,015	95	0,00106	1,00	0,238	0,05	9,441
	0,025	160	0,00177	1,00	0,236	0,08	5,695
	0,035	222	0,00247	1,11	0,238	0,12	4,049
	0,045	294	0,00318	1,12	0,231	0,15	3,196
	0,055	368	0,00389	1,14	0,226	0,18	2,647
	0,065	445	0,00459		0,221	0,21	2,265
15	0,015	204	0,00106	1,00	0,111	0,03	13,835
	0,025	342	0,00177	1,00	0,110	0,06	8,326
	0,035	478	0,00247	1,00	0,110	0,08	5,942
	0,045	612	0,00318	1,10	0,111	0,10	4,612
	0,055	765	0,00389	1,12	0,109	0,12	3,816
	0,065	922	0,00459		0,106	0,14	3,261
20	0,015	541	0,00106	1,00	0,004	0,02	22,531
	0,025	904	0,00177	1,00	0,004	0,03	13,536
	0,035	1262	0,00247	1,00	0,004	0,05	9,655
	0,045	1622	0,00318	1,00	0,004	0,06	7,508
	0,055	1987	0,00389	1,00	0,004	0,08	6,150
	0,065	2345	0,00459		0,004	0,09	5,200
25	0,015	1143	0,00106	1,00	0,002	0,01	32,749
	0,025	1910	0,00177	1,00	0,002	0,02	19,675
	0,035	2667	0,00247	1,00	0,002	0,03	14,035
	0,045	3428	0,00318	1,00	0,002	0,04	10,915
	0,055	4200	0,00389	1,00	0,002	0,05	8,941
	0,065	4950	0,00459		0,002	0,06	7,555

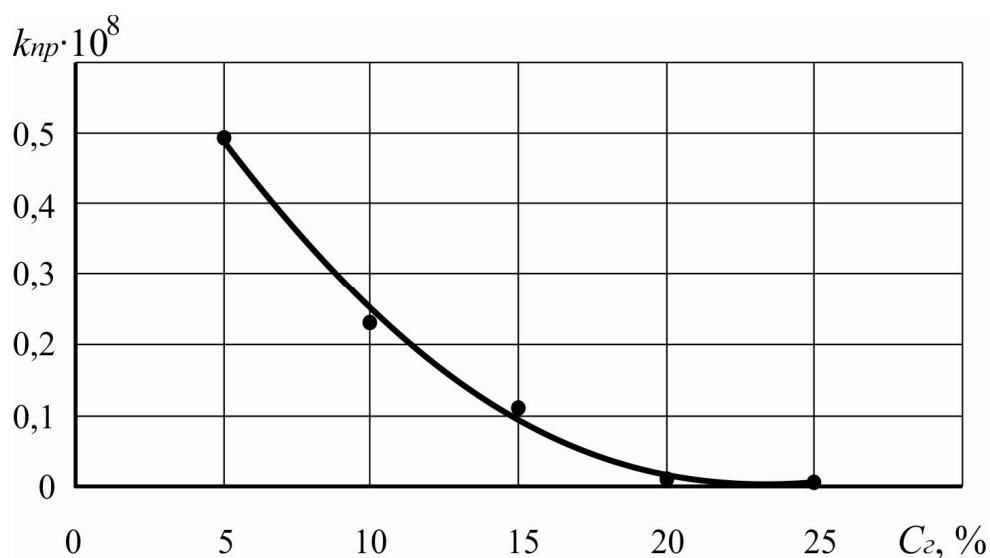


Рис. 2. Зависимость проницаемости пористой среды k_{np} от содержания в ней глинистых соединений C_2 .

Из графика на рис. 2 видно, что при содержании глины 20 % проницаемость пористой среды приближается к нулю, а 25 % и более наступает полная закупорка поровых каналов пористой среды.

Кривая на рис. 2 описывается следующим уравнением

$$k_{np} = 3,676 \cdot \exp(-0,302x)$$

При фильтрации газа через пористую среду, в которой кроме глины содержится еще и вода, возможно возникновение эффекта начального градиента давления [3]. Чем больше остаточная водонасыщенность и содержание глины, тем больше начальный градиент давления. При этом некоторое количество остаточной воды, не участвующей в основном движении жидкости в виде слоев, обволакивает частицы пористой среды перекрывающих (частично или полностью) поровые каналы, в связи с чем возникают нелинейные режимы фильтрации. При достаточно больших градиентах давления начинается перестройка этих слоев, сопровождающаяся изменением гидродинамического сопротивления пористой среды. В результате естественно ожидать непропорционально быстрого увеличения расхода фильтрующегося газа при росте перепада давления, т.е. закон фильтрации газа в среде, которая содержит слои связанной жидкости, обладающие упругостью, будет иметь вид, характерный для псевдопластичных неньютоновских жидкостей. В частности, если начальное содержание связанной жидкости настолько велико, что все поровые каналы в начальном состоянии перекрыты, то движение газа начнется только после того, как слои связанной воды будут частично прорваны. В связи с этим в таких условиях возможно появление предельного (начального) градиента для фильтрации газа. Это может происходить при фильтрации газа в глинизированных породах, содержащих остаточную воду, поскольку вода образует с частицами глины коллоидный раствор, который обладает некоторой устойчивостью на сдвиг. Одной из причин, вызывающих нелинейность фильтрационного закона, может служить эффект гистерезиса угла смачивания.

Одной из причин проявления начального градиента давления при фильтрации воздуха в пористой среде обрушенных зон содержащих глинистые фракции и остаточную воду, может быть возникновение, так называемого “пузырькового эффекта Жамена” [3], при котором, для проталкивания образовавшегося пузырька газа через сужение порового канала, необходимо приложить дополнительную силу, равную силе деформирующей пузырьки при прохождении суженной части канала и изменяющей кривизну его поверхности. Возникающий при этом дополнительный перепад давления может быть оценен как σ / r_n (отношение напряжений деформации пузырька к его радиусу). Начальный градиент давления определяется гистерезисом краевого угла смачивания (разницей косинусов отступающего и наступающего краевых углов), т.е. начальный градиент зависит от степени деформации пузырька газа при его фильтрации.

В случае, когда литологический состав поверхностного слоя обрушенной зоны сформирован таким образом, что глинистый материал отсутствует, то обрушенная зона оказывается под непосредственным воздействием атмосферных осадков. Поверхностные воды, попадающие в зону обрушения из атмосферных осадков и водных бассейнов, а также влажный рудничный воздух, фильтрующийся через отбитую руду и обрушенные покрывающие породы, увлажняют их. Степень увлажнения в зависимости от водообильности в различные сезоны года может колебаться во времени в значительных пределах. Влага в поровых каналах оказывает влияние на величину депрессии и количество фильтрующегося воздуха.

Влажность породы это содержание в образце какого-то количества влаги, удаляемого из него высушиванием при температуре 105 °С до постоянного веса.

Весовая влажность ω представляет собой отношение веса воды содержащейся в образце к весу сухой породы

$$\omega = \frac{G_B - G_C}{G_C}, \quad (1)$$

где G_B – вес влажного образца; G_C – вес того же образца, высушенного при 105°.

Влажность можно выразить объемной влажностью, определяемой объемом воды, содержащейся во влажном образце. Для оценки влажности используется также коэффициент влажности, или насыщения k_ω характеризующий степень заполнения пор породы или грунта водой:

$$k_\omega = \frac{\omega \delta}{m}, \quad (2)$$

где δ – объемный вес сухого образца; m – пористость образца.

Известно, что пористость породы m определяется как отношение суммарного объема пустот в породе V_{II} ко всему объему пород V т.е.

$$m = \frac{V_{II}}{V}. \quad (3)$$

Подставляя в (2) вместо ω и m выражения (1) и (3) получим

$$k_\omega = \frac{G_B - G_C}{V_{II}} \cdot \frac{\delta V}{G_C}.$$

Так как $\delta V = G_c$ то

$$k_{\omega} = \frac{G_B - G_C}{V_{II}} \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что $k_{\omega} = 0$ соответствует абсолютно сухому материалу, а при $k_{\omega} = 1$ поры образца кусковатого материала полностью заполнены водой.

С целью установления влияния влажности пористой среды на фильтрацию воздуха выполнены исследования с двумя гранулометрическими составами пород в отдельности: $-1 +0,5$ и $-6 +3$ мм, а также со смешанным составом из классов равных объемов фракций: $-1 +0,5$ и $-8 +6$ мм, загруженных в цилиндр после тщательного их перемешивания. Вначале порода засыпалась в цилиндр в сухом виде, после чего определялся вес породы, а затем производилась продувка фиксированными количествами воздуха с замером величины депрессии. Затем, породу извлекали и в нее добавляли 300–350 мл воды. После тщательного перемешивания вновь загружали в цилиндр.

Объем испарившейся воды в каждом опыте не превышал 2 мл. После каждого измерения породу из цилиндра извлекали, в нее добавляли следующую порцию воды (225–450 мл) и опыты повторялись до насыщения пористой среды. Полное насыщение достигалось тем, что цилиндр, заполненный постоянным количеством породы, заливался полностью водой, затем производили выдержку до тех пор, пока часть воды стекала через конус и патрубок. Прекращение капежа свидетельствовало о том, что пористая среда освобождена от избыточной воды, которую не в состоянии удерживать в порах, т. е. является максимально увлажненной. Далее определялся вес максимально увлажненной породы и производилась продувка. Поры исследуемого класса пород удерживают до 10 % воды от полного их насыщения, что составляет 2260 мл при заполненном объеме цилиндра $V_{II} = 0,05652 \text{ м}^3$, коэффициенте пористости $m = 0,34 \dots 0,4$ и вмещаемом количестве воды в порах при полном их насыщении 22600 мл. В табл. 2 и на рис. 3 приведены результаты исследований по фильтрации воздуха через пористую среду определенной фракции при различной влажности.

Таблица 2

Депрессия h , Па, при фильтрации воздуха через пористую среду фракции $-1 +0,5$ мм различной влажности

Расход воздуха, л/с	Депрессия h , Па, при влажности							
	0	1%	2%	3%	4%	6%	8%	10%
0,04	112	92	104	96	88	84	140	432
0,06	168	144	150	144	144	176	224	980
0,08	228	190	200	188	184	240	304	1392
0,1	284	238	248	240	240	296	380	1782

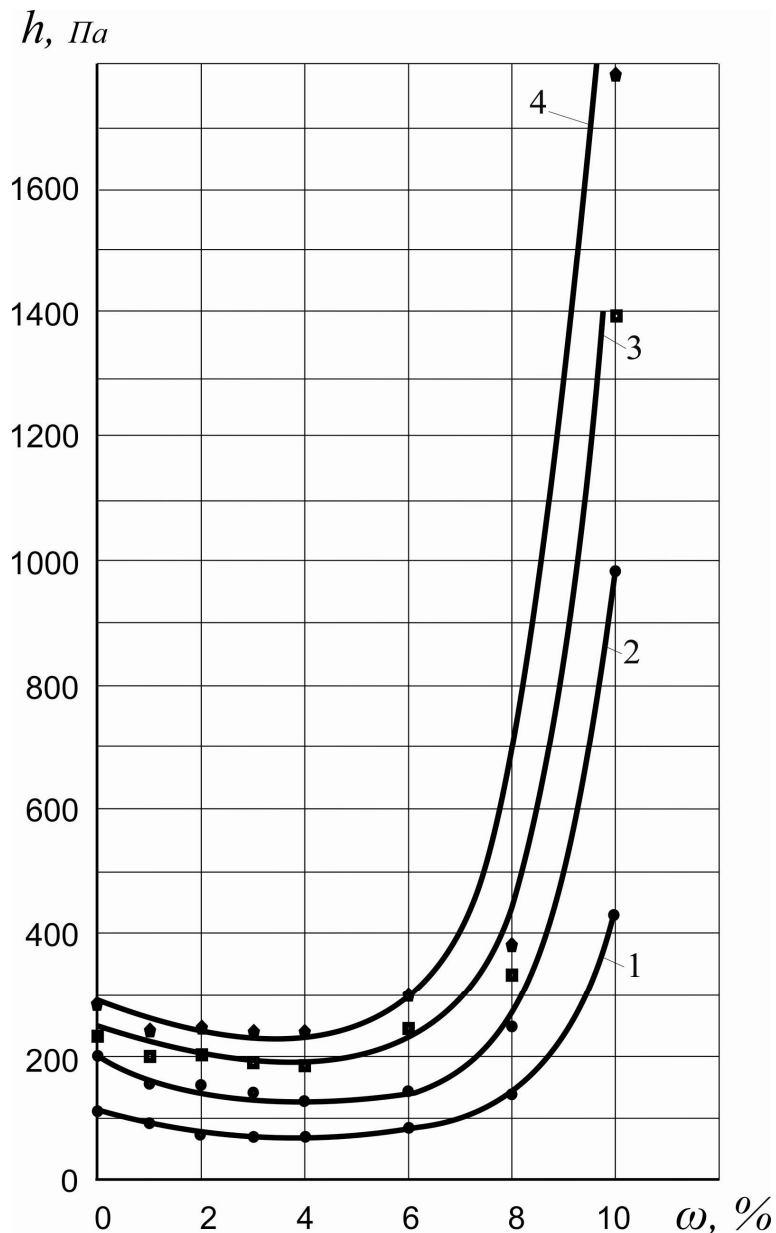


Рис. 3. Изменение депрессии в зависимости от влажности пористой среды из класса $-1 + 0.5$ мм: 1 – при $Q = 0,04$ л/с; 2 – при $Q = 0,06$ л/с; 3 – при $Q = 0,08$ л/с; 4 – при $Q = 0,1$ л/с.

Из графика видно, что незначительное увлажнение пористой среды приводит к падению депрессии при одном и том же количестве фильтрующегося воздуха, что указывает на снижение аэродинамического сопротивления среды при некотором увлажнении пор в связи со снижением величины трения воздуха о поверхность частиц породы. С возрастанием влажности сопротивление остается неизменным до определенного предела, а затем резко возрастает, что объясняется перекрытием одной части поровых каналов водой полностью и сужением водяным слоем другой части поровых каналов.

Особенно резкое возрастание сопротивления пористой среды наблюдается при полном насыщении ее влагой, что указывает на существенное влияние влаги на процессы фильтрации воздуха.

Проведенные исследования свидетельствуют о необходимости учета влажности горных пород при расчетах фильтрационных утечек рудничного воздуха. При относительно стабильных общешахтных перепадах давлений в зависимости от изменения влажности пористой среды обрушенных зон величина утечек воздуха может увеличиваться или уменьшаться в довольно широких пределах. Зависимость режима движения воздуха от влажности пористой среды обрушенных зон не наблюдается. Это связано с тем, что при большом насыщении руды водой, режим движения воздуха, как правило, ламинарный.

Поверхностные воды, попадая в зону обрушения не только увлажняют пористую среду, но и вызывают весьма важные явления которые происходят при движении в пористой среде нескольких фаз (воды и воздуха). Появление межфазных границ требует учета капиллярных сил. Их роль в зонах обрушения может быть определяющей. Это связано с малостью размеров пор. Так, относительная роль капиллярных сил по отношению к силе тяжести и силам вязкого сопротивления определяется отношениями, которые носят название капиллярных чисел [4]:

$$Ca_g = \frac{\rho g d^2}{\sigma}, \quad Ca = \frac{\mu u}{\sigma}, \quad (5)$$

где σ – межфазное натяжение, имеющее порядок 10 мН/м; ρ – плотность воздуха, кг/м³; μ – динамическая вязкость воздуха, Н·с/м²; u – скорость фильтрации, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; d – диаметр пор, мм.

Подставляя характерные значения в выражения (5), легко убедиться в справедливости утверждения о преобладании капиллярных сил. Поэтому в каждом элементе пористой среды фазы стремятся расположиться в соответствии с капиллярными силами. При этом мелкие поры оказываются занятыми более смачивающей жидкостью, а крупные – менее смачивающей. Большинство природных пористых сред гидрофильны, и смачивающей жидкостью для них является вода, а несмачивающей – воздух. Практически, пленка воды почти всегда существует на поверхности скелета грунта. Для несмачивающей фазы остаются расширения пор.

Детальная картина сосуществования двух фаз в поровом пространстве будет зависеть от их количества. Его обычно характеризуют фазовыми насыщенностями s_i , $i = 1, 2$. Насыщенность – это доля порового пространства, занятая данной фазой, так что $s_1 + s_2 = 1$. В частности, если насыщенность несмачивающей фазы достаточно мала, меньше некоторого критического значения s , эта фаза должна распасться на отдельные капли, которые заперты капиллярными силами и неспособны двигаться под действием обычных для пористой среды перепадов давления. Именно этим объясняется неизбежность защемления некоторого количества остаточной воды в пористой среде при вытеснении ее воздухом.

При насыщенности выше критической поровые каналы, занятые данной фазой, образуют связную сеть каналов и, возможно, течение. При критической насыщенности эта сеть каналов разрывается. Такой переход, происходящий при определенном соотношении между числом заполненных и незаполненных поровых каналов, является общим явлением для процессов проводимости во многих неупорядоченных физических системах.

Таким образом, в условиях преобладания поверхностного натяжения две жидкости, смачивающая и несмачивающая, например вода и воздух, занимают при данном соотношении между их насыщенностями строго определенное положение в порах. При этом течение их происходит по “своей” части порового пространства так, как если бы вторая фаза затвердела. Поэтому для каждой из фаз справедлив закон Дарси, но проницаемость уменьшается, так как часть порового пространства занята другой фазой. Отношение эффективной проницаемости к абсолютной (однофазной) проницаемости данной среды носит название относительной фазовой проницаемости для данной фазы. В основном обе фазы движутся под одним перепадом давления.

Выводы. На основании выполненных исследований установлено:

- изменение литологического состава пористой среды в обрушенных зонах оказывает существенное влияние на величину аэродинамического сопротивления среды и режим фильтрации воздуха в ней;

- основной причиной изменения аэродинамического сопротивления пористой среды зоны обрушений является процесс коагуляции происходящий в ее поверхностном слое во время которого происходит взаимодействие дисперсной фазы с дисперсионной средой коагулирующих растворов, а также поровой поверхности породы с внутрипоровой средой, в результате чего снижается проницаемость пористой среды обрушенных зон.

В результате исследований получены аэродинамические характеристики пористой среды в зависимости от изменения ее литологического состава, позволяющие с достаточной достоверностью определять значения параметров фильтрации для различных условий пористой среды обрушенных зон.

Список литературы

1. Ярцев В.А. К вопросу о прогнозе изменения величины аэродинамического сопротивления обрушений при увеличении глубины разработки/ В.А. Ярцев // Известия вузов. Горный журнал. – 1966. – № 4. – С. 47-54.
2. Ориатский Н.В. Исследование процесса коагуляции песков / Ориатский Н.В., Сергеев Е.М., Шехтман Ю.М. - М.: Изд. Моск. Университета, 1955. – 123 с.
3. Основы технологии добычи газа / Мирзаджанзаде А.Х., Кузнецов О.Л., Басниев К.С, Алиев З.С. - М.: ОАО «Издательство «Недра», 2003. – 880 с.
4. Баренблатт Г.И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. - М.: Недрa, 1984. - 211 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н.Голіньком В.І.
Надійшла до редакції 05.09.2014*