

Л. И. ЕВСТРАТЕНКО, аспирантка, Криворожский национальный университет

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРИСТОЙ СРЕДЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЗОН ОБРУШЕНИЙ КРИВБАССА НА РЕЖИМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА

Изучено влияние гранулометрического состава пористой среды в обрушенных зонах на величину их аэродинамического сопротивления. Показано, что режим движения воздуха в пористой среде зависит как от крупности одномерных частиц породы, так и объема мелких фракций, содержащихся в ней. Получены аэродинамические характеристики пористой среды в зависимости от изменения крупности одномерных частиц породы и объема мелких фракций, содержащихся в ней.

В результате выполненных исследований установлено влияние гранулометрического состава пористой среды аэроактивных зон обрушений Кривбасса на режимы фильтрации воздуха. Установлено, что режим движения воздуха в пористой среде зависит как от крупности одномерных частиц породы, так и объема мелких фракций, содержащихся в ней. Получены аэродинамические характеристики пористой среды в зависимости от изменения крупности одномерных частиц породы и объема мелких фракций, содержащихся в ней, позволяющие рассчитать фильтрационные потоки воздуха в обрушенных зонах при различных условиях проветривания горных выработок, а также определить параметры обрушенных зон (проницаемость, пористость и др.).

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. На эффективность функционирования вентиляционных систем при добыче руды с глубоких рудников Кривбасса значительное влияние оказывают аэродинамически активные зоны обрушений. Движение газа в пористой среде обрушенных зон связано с возникновением сильных возмущений, обусловленных чрезвычайно сложной конфигурацией пор. Скорости движения газа в пористой среде незначительны, по сравнению с движением в каналах. При движении газа в пористой среде наличие пор различного диаметра обуславливает переход от одного режима фильтрации в другой.

Анализ исследований и публикаций. Определение режима фильтрации газа в пористой среде обрушенных зон имеет большое теоретическое и практическое значение, так как без знания закона фильтрации в пористой среде обрушенных зон, особенно вблизи горных выработок, нет возможности рассчитать фильтрационные потоки воздуха, их изменения во времени, при различных условиях проветривания горных выработок, а также определить параметры обрушенных зон (проницаемость, пористость и др.).

Постановка задачи. Целью настоящей публикации является проведение исследований по установлению влияния гранулометрического состава пористой среды зон обрушений на режимы фильтрации воздуха.

Изложение материала и результаты. При исследовании режимов движения воздуха в каналах в качестве критерия, определяющего характер течения, как правило, используется число Рейнольдса Re , определяемое по формуле [1]

$$Re = \rho v d / \mu, \quad (1)$$

где d - эквивалентный диаметр канала, м; ρ - плотность воздуха, кг/м³; μ - динамическая вязкость воздуха, Н·с/м²; v - скорость движения воздуха, м/с;

При движении флюидов в пористой среде, как число Рейнольдса так и коэффициент сопротивления, зависят от характерного линейного размера площади фильтрации или порового диаметра, которые не могут быть строго определены, потому что их определение осуществляется на основе ряда допущений и предположений теории гидравлического радиуса [2]. Поэтому при определении режима фильтрации критическое число Рейнольдса не имеет точных значений. В этом случае целесообразней использовать в качестве критерия, определяющего режим фильтрации, показатель режима движения воздуха n , а там, где это возможно, оценивать характер движения и числом Рейнольдса.

Режим движения воздуха через любой канал зависит от скорости, кинематической вязкости и величины площади поперечного сечения канала. Следовательно, режим движения воздуха через пористую среду зоны обрушения определяется также, гранулометрическим составом и физико-механическими свойствами материала. Как показали многие исследователи [1-4], выражение для определения среднего диаметра пор d_{cp} идеального грунта, эквивалентного исследуемой породе, имеет вид

$$d_{cp} = 4\sqrt{2k_{cp}/m}, \quad (2)$$

где m - коэффициент пористости; $k_{пр}$ - коэффициент проницаемости пористой среды

Найденный по этой формуле размер поровых каналов является осредненной или даже в какой-то степени условной величиной, так как естественная порода состоит из пор различных размеров, при этом вряд ли поры такой породы имеют цилиндрическую форму.

Рассчитанный таким образом средний диаметр поры будет несколько меньше действительной величины в связи с тем, что при выводе формуле (2) длина пор естественной пористой среды принималась равной длине образца. В действительности же длина отдельного канала будет значительно больше, чем длина образца, поскольку поровый канал имеет, очевидно, существенную извилистость.

Многочисленные исследования образцов естественной пористой среды, отобранных из продуктивных горизонтов различных месторождений, показали, что средний диаметр поровых каналов, рассчитанный по приведенным выше формулам, колеблется от 1 до 25 мк [5].

Если принять $Q = \text{const}$, то гранулометрический состав пористой среды будет оказывать влияние на режим движения воздуха прямо пропорционально, т.е. чем меньше величина частиц породы, тем меньше величина поровых каналов, а, следовательно, и сама пористость, и тем меньше будет величина показателя режима движения воздуха через пористую среду.

Уменьшение величины поровых каналов может происходить не только за счет уменьшения крупности частиц пористой среды, но также и за счет внесения в состав из крупных частиц определенного количества мелких.

Поэтому режим движения воздуха в пределах скоростей, наблюдающихся в рудниках, должен зависеть как от крупности одномерных частиц породы, так и от объема мелких фракций, содержащихся в ней.

В связи с указанным первоочередной задачей исследований является определение зависимости между режимом движения воздуха и гранулометрическим составом пористой среды заданной крупности путем продувки его на установке.

Экспериментальные исследования. Проведенные исследования (табл. 1) по определению влияния гранулометрического состава пористой среды на режим движения воздуха в ней показали, что с уменьшением крупности горных пород снижается ее пористость и уменьшается показатель режима движения воздуха n .

Таблица 1

Определение параметров режимов движения воздуха

Класс крупности, мм	Замеренные величины параметров			Величины, определенные на основании замеров					
	v , м/с	ΔP , Н/м ²	m	Q , м ³ /с	n	$k_{пр}10^{-8}$, м ²	Re	f	d_{cp} , мм
-45 ÷ +30	0,015	1,000	0,543	0,00106	1,97	22,65	0,48	0,969	14,7
	0,025	2,77		0,00177	1,98	13,53	0,62	0,752	
	0,035	5,38		0,00247	1,99	9,70	0,74	0,635	
	0,045	8,86		0,00318	2,0	7,59	0,84	0,558	
	0,055	13,28		0,00389	2,0	6,18	0,92	0,505	
	0,065	18,50		0,00459		5,30	1,01	0,461	
-30 ÷ +20	0,015	1,22		0,00106	1,80	18,88	0,44	1,061	
	0,025	3,10		0,00177	1,96	11,83	0,58	0,804	
	0,035	5,94		0,00247	1,97	8,61	0,69	0,673	
	0,045	9,75		0,00318	1,97	6,7	0,79	0,594	
	0,055	14,53		0,00389	1,99	5,56	0,87	0,534	
	0,065	20,20		0,00459		4,86	0,97	0,483	
-20 ÷ +10	0,015	2,24		0,00106	1,5	11,21	0,34	1,377	
	0,025	4,85		0,00177	1,65	7,48	0,46	1,011	
	0,035	8,41		0,00247	1,70	5,91	0,57	0,813	
	0,045	12,93		0,00318	1,71	4,97	0,68	0,690	
	0,055	18,24		0,00389	1,78	2,35	0,77	0,603	
	0,065	24,50		0,00459		4,06	0,88	0,532	

-10÷+8	0,015	4,28	0,425	0,00106	1,30	5,38	0,24	1,987
	0,025	8,34		0,00177	1,31	4,51	0,36	1,302
	0,035	18,04		0,00247	1,33	3,72	0,56	0,797
	0,045	23,66		0,00318	1,34	3,46	0,69	0,676
	0,055	29,70		0,00389	1,37	3,31	0,8	0,585
	0,065	5,71		0,00459		3,335	0,21	2,236
-8÷+6	0,025	10,35		0,00177	1,25	3,6	0,32	1,459
	0,035	15,71		0,00247	1,30	3,24	0,43	1,098
	0,045	21,78		0,00318	1,31	3,01	0,53	0,886
	0,055	28,38		0,00389	1,32	2,85	0,63	0,744
	0,065	35,30		0,00459		2,78	0,73	0,638
	0,015	6,81		0,00106	1,21	3,41	0,19	2,498
-6÷+3	0,025	12,67		0,00177	1,22	2,98	0,29	1,601
	0,035	19,08		0,00247	1,25	2,84	0,4	1,172
	0,045	26,06		0,00318	1,32	2,55	0,48	0,962
	0,055	34,05		0,00389	1,36	2,39	0,57	0,814
	0,065	42,60		0,00459		2,30	0,67	0,701
	0,015	11,62		0,00106	1,00	2,09	0,15	3,192
-3÷+1	0,025	19,41		0,00177	1,10	1,92	0,23	1,995
	0,035	28,06		0,00247	1,13	1,79	0,32	1,476
	0,045	37,24		0,00318	1,15	1,74	0,4	1,164
	0,055	47,00		0,00389	1,22	1,7	0,48	0,966
	0,065	57,50		0,00459		1,71	0,57	0,814
	0,015	16,52		0,00106	1,00	1,48	0,12	3,785
-1÷+0,5	0,015	16,52		0,00177	1,00	1,37	0,2	2,361
	0,025	27,60		0,00247	1,14	1,29	0,27	1,737
	0,035	38,55		0,00318	1,15	1,25	0,34	1,374
	0,045	51,30		0,00389	1,17	1,25	0,41	1,125
	0,055	64,75		0,00459		1,24	0,49	0,952
	0,065	78,60						

Замеры параметров приведенных в табл. 1 производились в следующих условиях: площадь фильтрации – $F=0,07065 \text{ м}^2$; толщина слоя – $L=0,8 \text{ м}$; температура воздуха – $t=200 \text{ °С}$; давление воздуха – $p=101,3 \text{ кПа}$; плотность воздуха – $\rho=1,22 \text{ кг/м}^3$; вязкость воздуха – $\mu=18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Н·с/м}^2$. Пористость породы определялась в лабораторных условиях методом насыщения [6].

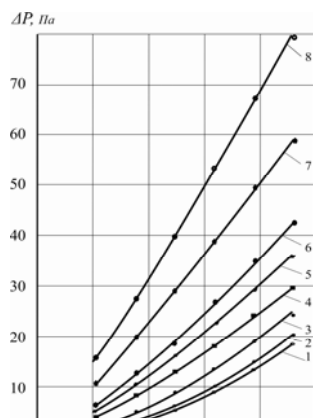


Рис. 1. Аэродинамические характеристики пористых сред с различным гранулометрическим составом: 1,2,3,4,5,6,7,8 - аэродинамические характеристики соответственно для классов крупности пород -45÷+30, -30÷+20, -20÷+10, -10÷+8, -8÷+6, -6÷+3, -3÷+1 и -1÷+0,5

На основании замеров получены аэродинамические характеристики пористых сред с различным гранулометрическим составом (рис. 1), представляющие собой графики зависимости ΔP от Q .

На основании зависимостей получены регрессионные уравнения для различных классов крупности горных пород

$$\begin{aligned}
 -45 \div +30 \quad \Delta P &= 849494 Q^{1,99}; & -30 \div +20 \quad \Delta P &= 689350 Q^{1,93} \\
 -20 \div +10 \quad \Delta P &= 24825650 Q^{1,7} & -10 \div +8 \quad \Delta P &= 39351 Q^{1,34} \\
 -8 \div +6 \quad \Delta P &= 38439 Q^{1,3} & -6 \div +3 \quad \Delta P &= 39750 Q^{1,27} \\
 -3 \div +1 \quad \Delta P &= 28309 Q^{1,15} & -1 \div +0,5 \quad \Delta P &= 34395 Q^{1,13}
 \end{aligned} \quad (3)$$

Соотношения (3) можно рассматривать как зависимости, аппроксимирующие экспериментальные данные, и соответствующим образом трактовать входящие в них параметры как регрессионные коэффициенты. Видно, что показатель степени при Q уменьшается с уменьшением крупности горных пород, следовательно режим фильтрации изменяется с изменением фракционного состава горных пород от турбулентного к ламинарному.

Для нахождения границы турбулентного и комбинированного режимов, в первую очередь исследовались крупные фракции породы.

Опыты, проведенные с фракциями $-45\div+30$, $-30\div+20$ и $-20\div+10$ мм, показали, что такая крупность частиц пород в пределах расхода воздуха от $0,00106$ до $0,00459$ м³/с определяет турбулентный режим.

На рис. 2 представлены графики зависимости $\lg h$ от $\lg Q$, построенные для различных фракций.

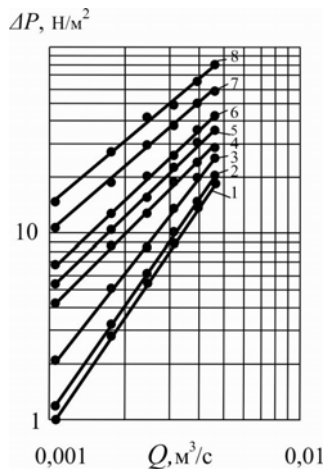


Рис. 2. Графики зависимости ΔP от Q для пористых сред с различным фракционным составом: 1 – с размером фракций $-45\div+30$; 2 – с размером фракций $-30\div+20$; 3 – с размером фракций $-20\div+10$; 4 – с размером фракций $-10\div+8$; 5 – с размером фракций $-8\div+6$; 6 – с размером фракций $-6\div+3$; 7 – с размером фракций $-3\div+1$; 8 – с размером фракций $-1\div+0,5$

Из графиков видно, что тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс для фракций: $-45\div+30$ и $-30\div+20$ равен $2,0$. Что указывает на турбулентный режим для данного диапазона скоростей фильтрации воздуха. Для более мелких фракций режим движения в том же диапазоне расходов воздуха соответствует комбинированному. Так, для класса $-20\div+10$ мм показатель $n = 1,67$; $-10\div+8$ мм $n = 1,33$; $-8\div+6$ $n = 1,27$; $-6\div+3$ $n = 1,27$; $-3\div+1$ $n = 1,25$ и для класса $-1\div+0,5$ $n = 1,09$.

Таким образом, в пределах напоров в опытах, границей турбулентного и комбинированного режимов на основании определенного значения n является крупность частиц, лежащая между фракциями $-30\div+20$ и $-20\div+10$ мм. Классы мельче $-1\div+0,5$ мм испытанию не подвергались, поскольку для них характерен ламинарный режим. На основании опытных данных определялось число Re и коэффициент сопротивления f . Расчет остальных параметров, входящих в табл. 1, осуществлялся по известным выражениям [1, 5].

Результаты расчета (табл. 1) свидетельствуют о том, что величина коэффициента проницаемости k_{np} для крупных классов ($-45\div+30$ до $-3\div+1$ мм) непостоянна и меняется в зависимости от изменения Q и h , в особенности для турбулентного и близкого к нему режима движения воздуха (при $n=2$) и почти не меняется для класса $-1\div+0,5$ мм. Это объясняется тем, что коэффициент k_{np} является характеристикой пористой среды при ламинарном течении и применение его в уравнениях второго порядка не правомерно.

При стабильном показателе режима движения ($n=2$), число Re имеет двенадцать различных значений: от $0,44$ до $1,01$.

Для каждой области комбинированного режима, характеризующегося показателем n , число Re изменяется в широких пределах. Более того, одинаковые значения числа Re встречаются в двух соседних, отличных друг от друга областях комбинированного режима.

Например, для области с $n=1,67$ и области с $n=1,33$ имеется значение Re , равное в первом случае $4,06$, во втором – чуть большим значением – $4,08$.

Такой разброс чисел Re можно объяснить тем, что с одной стороны, с увеличением скорости движения воздуха в порах, увеличивается и значение числа Re , а с другой, с уменьшением класса крупности частиц породы, т.е. с уменьшением характерных размеров поровых каналов, уменьшается значение числа Re .

С уменьшением крупности частиц породы снижается значение числа Re , а возрастание скорости в пределах одного и того же класса крупности частиц породы вызывает увеличение числа Re . В связи с указанным возникают трудности при использовании числа Re в качестве критерия режима движения флюида в условиях пористой среды, в силу неопределенности его значений зависящих как от скорости фильтрации воздуха, так и от фракционного состава пород.

Вероятно, для оценки режима движения флюида при фильтрации с помощью числа Re , необходимо более точно определять характерную скорость потока и его характерный размер.

Таким образом, использование показателя n в качестве критерия режима фильтрации позволяет более достоверно определять основные фильтрационные характеристики в зонах обрушения.

Для определения влияния на фильтрационные характеристики пористой среды содержания мелких фракций породы исследовались двухкомпонентные смеси из пород различного гранулометрического состава: $-45\div+30$ и $-1\div+0.5$ мм (табл. 2).

Таблица 2

Определение параметров режимов движения воздуха в пористой среде из двухкомпонентных составов горных пород

Содержание фракции $-1\div+0,5$ мм во фракционном составе $-45\div+30$ мм, %	Замеренные величины параметров		Величины, определенные на основании замеров				
	$v, \text{м/с}$	$\Delta P, \text{Н/м}^2$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	n	$k_{np} 108, \text{м}^2$	Re	f
10	0,015	22	0,00106	1,50	1,138	0,11	4,321
	0,025	48	0,00177	1,65	0,760	0,15	3,174
	0,035	83	0,00247	1,70	0,60	0,18	2,551
	0,045	127	0,00318	1,71	0,504	0,22	1,750
	0,055	180	0,00389	1,78	0,441	0,25	1,894
	0,065	242	0,00459		0,406	0,28	1,669
20	0,015	72	0,00106	1,30	0,318	0,06	8,174
	0,025	140,6	0,00177	1,31	0,267	0,09	5,357
	0,035	218	0,00247	1,33	0,241	0,12	4,026
	0,045	304	0,00318	1,34	0,220	0,14	3,279
	0,055	400	0,00389	1,37	0,205	0,17	2,776
	0,065	502	0,00459		1,950	0,19	2,407
30	0,015	167,5	0,00106	1,14	0,141	0,04	12,276
	0,025	301	0,00177	1,18	0,124	0,06	7,866
	0,035	446	0,00247	1,19	0,116	0,08	5,812
	0,045	601	0,00318	1,21	0,110	0,10	4,628
	0,055	769	0,00389	1,25	0,105	0,12	3,876
	0,065	946	0,00459		0,104	0,14	3,302
40	0,015	324	0,00106	1,00	0,074	0,03	16,92
	0,025	542	0,00177	1,10	0,069	0,04	10,56
	0,035	784	0,00247	1,13	0,065	0,06	7,753
	0,045	1040	0,00318	1,15	0,063	0,08	6,124
	0,055	1313	0,00389	1,17	0,062	0,09	5,070
	0,065	1594	0,00459		0,062	0,11	4,287
50	0,015	547	0,00106	1,00	0,043	0,021	22,32
	0,025	915	0,00177	1,00	0,041	0,034	13,59
	0,035	1277	0,00247	1,00	0,040	0,048	9,812
	0,045	1641	0,00318	1,05	0,040	0,061	7,630
	0,055	2028	0,00389	1,07	0,040	0,075	6,249
	0,065	2420	0,00459		0,040	0,088	5,284

На рис. 3 приведены графики полученные на основании экспериментов для двухкомпонентных смесей фракций ($-45\div+30$ и $-1\div+0.5$ мм) в различных соотношениях (см.табл. 2).

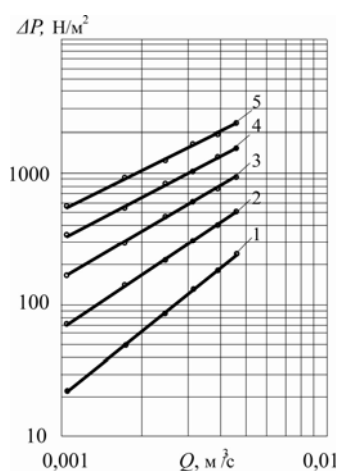


Рис. 3. Графики зависимости ΔP от Q в логарифмической координатной сетке для двухкомпонентных смесей $-45\div+30$ и $-1\div+0.5$ мм в различных соотношениях: 1 – 90 и 10 %; 2 – 80 и 20%; 3 – 70 и 30 %; 4 – 60 и 40 %; 5 – 50 и 50 %

Из графиков (рис. 3) видно, что показатель режима движения воздуха через смесь, определяемый как тангенс угла наклона прямой, находится в прямой зависимости от объемного количества мелкой фракции в смеси.

При смешивании различных фракций основным условием является равномерное распределение мелких частиц породы среди крупных.

Чем равномерней распределение, тем достоверней результаты по определению режима движения через двухкомпонентную смесь.

На основании результатов экспериментов получены графики изменения показателя режима движения воздуха через смеси из различного фракционного состава пород в зависимости от процентного содержания определяющего класса.

На рис. 4 приведен график зависимости показателя режима фильтрации через двухкомпонентные смеси от объема определяющего фракционного класса $-1\div+0,5$ мм.

График показывает характер изменения режима фильтрации воздуха через двухкомпонентную смесь из фракций: $-45\div+30$ мм и определяющего $-1\div+0,5$ мм.

Аппроксимация экспериментальных данных производилась уравнением вида $n=ac^b$

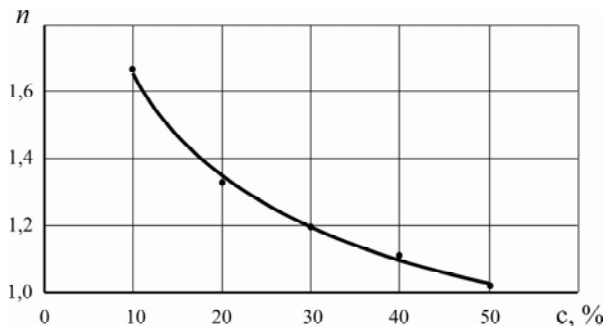


Рис. 4. График зависимости показателя режима фильтрации воздуха от объема определяющего класса $-1\div+0,5$ мм

В результате математической обработки опытных данных была получена зависимость величины показателя режима фильтрации n от содержания в пористой среде мелких фракций породы с достоверностью $R_2 = 0,9974$

$$n = 3,2843c^{-0,2971}$$

Выводы и направления дальнейших исследований. В результате выполненных исследований установлено влияние гранулометрического состава пористой среды аэроактивных зон обрушений Кривбасса на режимы фильтрации воздуха. Установлено, что режим движения воздуха в пористой среде зависит как от крупности одномерных частиц породы, так и от объема мелких фракций, содержащихся в ней.

Получены аэродинамические характеристики пористой среды в зависимости от изменения крупности одномерных частиц породы и от объема мелких фракций, содержащихся в ней, позволяющие рассчитать фильтрационные потоки воздуха в обрушенных зонах при различных условиях проветривания горных выработок, а также определить параметры обрушенных зон (проницаемость, пористость и др.).

Список литературы

1. Ушаков К. З. Газовая динамика шахт / К.З. Ушаков. – М.: Изд. МГГУ, 2004. – 481 с.
2. Шевелев Г.А. Фильтрация газа в шахтах / Г.А. Шевелев, В.Т. Перепелица. – К.: Наукова думка, 2010. – 291 с.
3. Пятибрат В.П. Подземная гидромеханика / В.П. Пятибрат – Ухта: УГТУ, 2002. – 100 с.
4. Квеско Б.Б. Подземная гидромеханика / Б.Б. Квеско. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 181 с.
5. Басниев К.С. Подземная гидромеханика / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Р.Д. Каневская и др. – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 496 с.
6. Ковалева Л.А. Физика нефтегазового пласта / Л.А. Ковалева. – Уфа: РИО БашГУ, 2008. – 280 с.
7. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика / И.А. Чарный. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 436 с.
8. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Гос. из-во физ.-мат. лит., 1959. – 699 с.
9. Lewis G.N. Thermodynamics / G.N. Lewis, M. Randall. – New York: Van Nostrand Company, 1923. – 162 p.
10. Oshmyansky I.B. Substantiation of parameters of filtration flows in mining collapsed areas / I. B. Oshmyansky, L. I. Yevstratenko // – Balkema, CRC Press: Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining – 2014 Taylor & Francis Group, London, ISBN: 978 – 1 – 138 – 02699 – 5, p. 373 – 378.
11. Сологаев В.И. Гидравлика (механика жидкости и газа) / В. И. Сологаев. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. – 64с.
12. Форхгеймер Ф. Гидравлика / Ф. Форхгеймер. – М.; Л.: ОНТИ, 1935. – 616 с.
13. Жаворонков Н. М. Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередача в скрубберах / Н. М. Жаворонков – М.: Госиздат «Советская наука», 1944. – 224 с.
14. Englund F. On the Laminar and Turbulent Flows of Ground Water through Homogeneous Sand / F. Englund // – Transactions of the Danish: Academy of Technical Sciences – 1953. – № 3. – P. 356 – 361.
15. Щелкачев В.Н. Подземная гидравлика / В. Н. Щелкачев, Б.Б. Лапук – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 736стр.
18. Лейбензон Л.С. Собрание трудов, т. II. Подземная гидрогазодинамика, подземная гидравлика / Л.С. Лейбензон – М.: Изд. АН СССР, 1953. – 456 с.
19. Чарный И. А. Основы подземной гидравлики / И. А. Чарный. – М.-Л.: Гостехиздат, 1956. – 260 с.

Рукопись поступила в редакцию 17.03.15