Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. L, вып. 1, 1965 г.

ГИДРОМОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ ЗАГАЗОВАННЫХ ВЫРАБОТОК

П. И. Мустель

Изучение на моделях проветривания глухих забоев, камер, лав и других выработок после взрывания шпуров позволяет получать не только качественную характеристику процесса, но и необходимые для расчетов количественные соотношения.

Одно из первых исследований процесса разжижения взрывных газов выполнено И. А. Швырковым [1], который вывел известную зависимость

$$Q = \frac{V}{kt} \ln \frac{C_н}{C_к}, \qquad (1)$$

где Q — количество воздуха, необходимое для проветривания забоя, *м³/мин*;

V — объем, на который распространяются газы после взрывания шпуров, *м³*;

t — время проветривания, *мин*;

$C_н$ и $C_к$ — начальная и конечная концентрации ядовитых газов в забое, %,

k — опытный коэффициент, учитывающий неравномерность перемешивания газо-воздушной смеси в призабойной части выработки, названный И. А. Швырковым коэффициентом захватывания.

Для определения величины k И. А. Швырков рекомендовал провести опыты на гидромоделях, используя в качестве взрывных газов раствор поваренной соли. Для соблюдения подобия явлений он считал необходимым, кроме геометрического подобия, выполнять равенство в натуре и модели чисел Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{vl}{\nu}, \qquad (2)$$

Пекле

$$\mathrm{Pe} = \frac{vl}{D} \qquad (3)$$

и Фурье

$$\mathrm{Fo} = \frac{Dt}{l^2}, \qquad (4)$$

где v — скорость движения воды в модели;

l — характерный линейный размер;

ν — кинематический коэффициент вязкости;

D — коэффициент диффузии жидкостей и газов;

t — время проветривания.

Учитывая невозможность одновременного соблюдения равенства всех чисел, И. А. Швырков считал достаточным выдерживать в опытах только равенство чисел Рейнольдса и геометрическое подобие.

Рекомендации И. А. Швыркова были использованы П. И. Вороновым и М. М. Ольвовским, которые в 1935 г. провели под руководством акад. А. А. Скочинского исследование процессов проветривания глухих забоев после взрывания шпуров. Предварительные опыты были проведены на гидромоделях, в которых в качестве «вредных газов» применялась красная анилиновая краска, а основные опыты выполнены в аэромоделях [2]. В этих опытах вместо ядовитых газов фигурировал дым — продукт сгорания специальной смеси реактивов. Изменение его концентрации, как и концентрации краски в гидромоделях, определялось с помощью фотоэлементов. Авторы заменили выражение $\frac{1}{k}$ в формуле (1) через k' и определили опытным путем его значение. На основании проведенных опытов они предложили свою методику расчета количества воздуха, необходимого для проветривания глухих забоев после взрывания шпуров. В этом расчете полное время проветривания выработки принималось равным сумме времени, необходимого для проветривания зоны смешения, и времени, необходимого для проветривания остальной части выработки. Если начальная концентрация ядовитых газов в зоне смешения, по заключению авторов, не превышает 1%, то для полного проветривания необходимо обменять в ней воздух (коэффициент обмена) 6 раз, а если превышает 1%, то 10 раз.

Значения коэффициентов обмена зоны смешения, в зависимости от начальной концентрации, были в дальнейшем исследованы в натуре А. И. Ксенофонтовой и Л. Ю. Берманом [3], которые установили, что при изменении отношения $\frac{C_н}{C_к}$ от 10 до 35 коэффициент обмена в зоне смешения изменяется от 2 до 4,5, а коэффициент обмена всей выработки — от 1,5 до 2,5.

По предложенной нами методике исследования проветривания забоев на гидромоделях, в качестве аналога чистого воздуха используется вода, а в качестве аналога ядовитых газов — окрашенные жидкости, в частности раствор $KMnO_4$ [4]. Изменение концентрации констатируется колориметром Дюбоска. Простота этой методики делает ее доступной для широкого использования в изучении процессов проветривания глухих забоев, при проходке штрекообразных и шахтообразных выработок, камер, лав и других горных выработок.

Критерий подобия в гидромоделировании установлен нами анализом размерностей величин, от которых зависит процесс разжижения газов, образовавшихся после взрыва шпуров: Q — количества подаваемого в забой свежего воздуха, *м³/мин*; t — времени, прошедшего с начала проветривания, *мин*; V — объема, подлежащего проветриванию, *м³*.

Безразмерная комбинация этих величин

$$K = \frac{Qt}{V}$$

является коэффициентом обмена, показывающим сколько раз за время проветривания обменивается воздух в проветриваемом объеме V.

Если при выполнении модели в масштабе $1 : m$ все линейные размеры ее уменьшить по сравнению с натурой в m раз, а количество подаваемой в модель чистой воды — в m^3 раз, то время проветривания в натуре и модели будет одинаковым, что очень удобно при производстве опытов. Количество окрашенной жидкости, подаваемое в забой для имитации взрывных газов, должно быть в m^3 раз меньше количества газов, образующихся в натуре. Детальное исследование процесса моделирования привело к необходимости отказа от соблюдения аэродинамического подобия, в частности от соблюдения равенства чисел Рейнольдса в натуре и модели. Несмотря на большую разницу кинематической вязкости воды

и воздуха, скорости движения жидкости в гидромоделях очень большие, значение Q в десятки и сотни раз превышает расчетное, а время производства опыта t во столько же раз сокращается по сравнению с натурой. Это значимо искажает процесс, так как снижает до нуля влияние диффузии.

Между тем, на процесс проветривания большое влияние оказывает диффузия газов, зависящая от коэффициентов самодиффузии всех ядовитых газов, образующихся после взрывания шпуров, а также от концентрации газов. Коэффициент самодиффузии, в свою очередь, зависит от средней скорости и длины свободного пробега молекул газов.

Как показали наши опыты, при заметном по сравнению с натурой увеличении подаваемой в модель чистой воды Q подобие процессов нарушается, вследствие чего время проветривания уменьшается не пропорционально увеличению Q, коэффициент обмена уменьшается, проветривание в модели идет относительно быстрее, чем в натуре, так как влияние диффузии на процесс проветривания уменьшается.

При заниженной подаче воды коэффициент обмена при прочих равных условиях увеличивается, время проветривания также увеличивается отчасти за счет уменьшения турбулентности потока, а главным образом за счет увеличения влияния диффузии. Наблюдения показывают, что и в натуре при малой скорости движения воздуха газы за счет диффузии иногда очень быстро распространяются против движения свежей струи, что приводит к задержке проветривания при нагнетательном, а особенно всасывающем способе вентиляции.

Поскольку влияние диффузии в значительной мере зависит от времени, в течение которого проходит опыт, при лабораторных исследованиях рекомендуется устанавливать такой режим «проветривания», при котором модель очищается от окрашенной жидкости за время, близкое к обычно отводимому на проветривание выработки в натуре. В этом случае будут получены результаты, близкие к действительности.

В призабойном пространстве при нагнетательном способе проветривания образуется зона деятельного перемешивания взрывных газов за счет воздушной струи, выходящей из конца вентиляционных труб, роль молекулярной диффузии значительно снижается и, наоборот, возрастает роль турбулентной диффузии. Поэтому при моделировании нагнетательного проветривания необходимо искусственно турбулизировать струю воды, вытекающую из насадка, имитирующего конец вентиляционных труб. Для этого в насадок в наших опытах вставлялись полоски жести, закрученные спиралью.

Модели выработок могут быть открытыми и закрытыми. Наши модели шахтообразных выработок изготавливались из круглых стеклянных трубок, а модели штрекообразных выработок — в виде открытых деревянных лотков, выполненных в масштабе 1 : 50 и 1 : 100 (рис. 1). В подпорной стенке *1* устраивался водоотливный желоб *2* и вставлялась стеклянная трубка, снабженная краном *3*. Промывочная вода подавалась по стеклянным трубкам *4* и *5* из напорного бака с постоянным уровнем или непосредственно из водопровода.

Перед началом опыта по нагнетательному проветриванию (рис. 1, *а*) сперва при закрытом зажиме *3* заполняется водой лоток, затем постепенно открывается кран *6*, сосудом *7* по водосливу измеряется расход воды и устанавливается требуемый, рассчитанный предварительно в соответствии с условиями опыта. После этого приоткрывается зажим *3* так, чтобы часть воды начала вытекать через трубку. После установления режима «проветривания» в «призабойное пространство» лотка выливается точно отмеренное количество окрашенного раствора, одновременно включается секундомер и под водослив подставляется мерный сосуд для сбора сливающейся жидкости. Вначале из лотка выливается чистая вода, средняя концентрация окрашенного раствора в лотке в этот период равна начальной. Она

остается некоторое время неизменной и определяется ординатой точек $a' - a''$ (рис. 2). Когда окрашенная жидкость доходит до желоба *2* (рис. 1, *а*), сосуд *7* необходимо заменить другим.

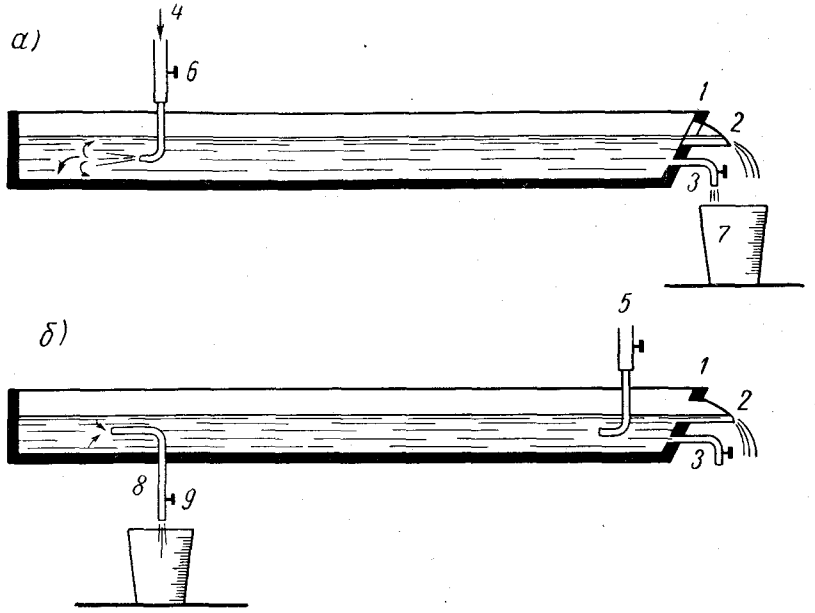


Рис. 1. Модели штрекообразных выработок при нагнетательном (*а*) и всасывающем (*б*) проветривании.

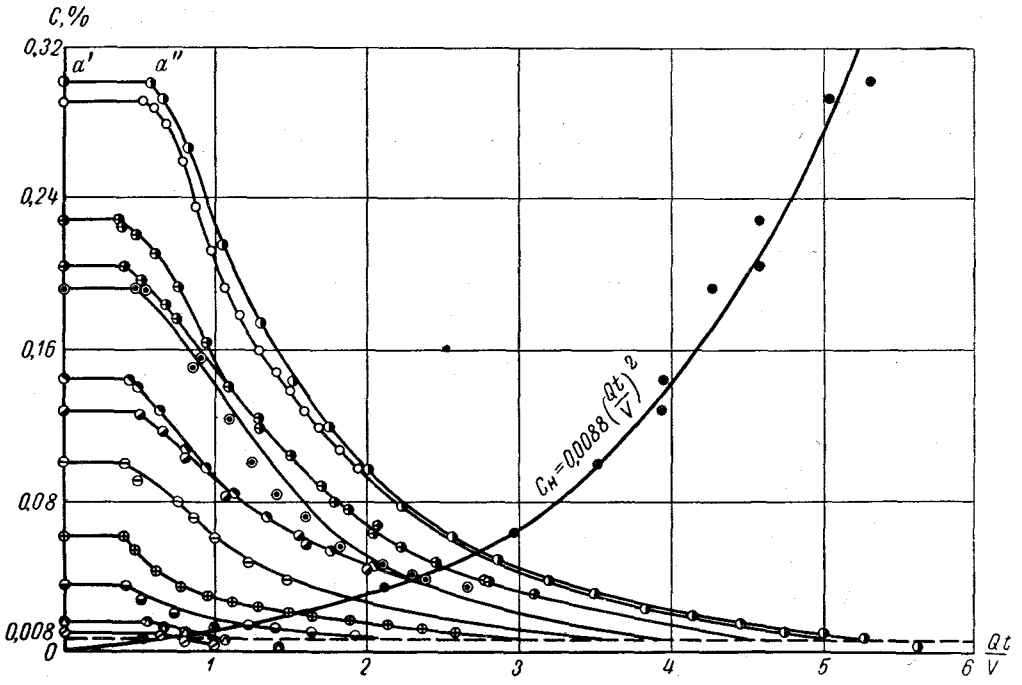


Рис. 2. Изменение средней концентрации окрашенного раствора при нагнетательном проветривании.

В дальнейшем из лотка вытекает уже окрашенная жидкость, которая собирается в мерные сосуды, сменяемые через 0,5—3 *мин* в зависимости от желаемой точности отсчетов и быстроты изменения концентрации

раствора. Записывается объем каждой отобранной пробы и часть ее отливается в пробирку для последующего анализа. Опыт заканчивается тогда, когда вся вода в лотке получит слаборозовую окраску. По окончании опыта закрывают зажим *3*, перекрывают кран *6*, затем воду из лотка выливают в мерный сосуд и измеряют ее количество, определяя таким образом точно объем V, который от опыта к опыту может несколько меняться. Методику измерений и подсчетов покажем на следующем примере.

В лоток объемом 660 *см*^{3} вылито 45 *см*^{3} концентрированного раствора $KMnO_4$, имитирующего взрывные газы A, содержащие 4,4% CO. Это содержание CO установлено расчетом. Оно не претендует на большую точность, но и не вносит погрешности в работу, так как степень разжижения газов свежим воздухом определяется отношением $\frac{C_н}{C_к}$, где $C_н$ и $C_к$ — начальная концентрация ядовитых газов в забое и конечная, определяемая правилами безопасности (0,008% по объему). В числитель и знаменатель этого отношения вносится одинаковая погрешность, которая взаимно уничтожается. Концентрация 4,4% придана условно исходному раствору $KMnO_4$ только для удобства дальнейших расчетов и получения концентрации во время опытов в лотке, близкой к концентрации ядовитых газов в выработке. Поступление свежей воды в лоток — 75 *см*^{3}/*мин* (точности в определении расхода, как видно из дальнейших подсчетов, не требуется). Результаты опыта сведены в прилагаемую таблицу.

Сводная таблица замеренных и вычисленных величин

C, %	Qt, *см*^{3}	t, *мин*	a, *см*^{3}	$A - \Sigma a$, *см*^{3}	$C_{ср}$, %	$\frac{Qt}{V}$	$\frac{Qt}{V}$ ср
1	2	3	4	5	6	7	8
0	375	4′30″	0	45	0,30*	0,57	
0,036	82	1′	0,82	44,18	0,294	0,70	0,63
0,123	153	2′	4,30	39,88	0,266	0,93	0,82
0,22	150	2′	7,50	32,38	0,216	1,15	1,04
0,18	153	2′	6,30	26,08	0,174	1,39	1,27
0,138	150	2′	4,72	21,36	0,142	1,60	1,50
0,104	150	2′	3,56	17,80	0,119	1,84	1,72
0,083	150	2′	2,83	14,97	0,100	2,06	1,95
0,065	220	3′	3,25	11,72	0,078	2,40	2,23
0,0509	215	3′	2,49	9,23	0,0615	2,70	2,55
0,04	212	3′	1,93	7,30	0,0487	3,03	2,86
0,0308	217	3′	1,52	5,78	0,0386	3,36	3,20
0,0232	210	3′	1,11	4,67	0,0312	3,67	3,51
0,0188	205	3′	0,88	3,79	0,0253	4,00	3,83
0,0172	207	3′	0,81	2,98	0,0199	4,30	4,15
0,0156	207	3′	0,74	2,24	0,0149	4,60	4,45
0,0128	207	3′	0,60	1,64	0,0109	4,90	4,75
0,008	130	2′	0,24	1,40	0,0093	5,10	5,00
0,0064	220	3′15″	0,32	1,08	0,0072	5,45	5,27
0,004	187	2′45″	0,17	0,9	0,006	5,75	5,60
Следы	660	—	0,90	—	Следы	—	—

* Начальная концентрация в лотке.

Графа 1. Концентрация выливающейся окрашенной жидкости C в пересчете на ядовитые газы может быть определена при помощи фотоэлемента, колориметра или другим каким-либо способом. Нами применялся колориметр Дюбоска, который предварительно тарировался. Для этого основной

раствор, концентрацию которого в пересчете на ядовитые газы мы приняли, как указано ранее, 4,4%, разбавлялся последовательно в 2 раза — получались растворы 2,2; 1,1; 0,55; 0,275; 0,1375; 0,06875; 0,03437; 0,01718 0,0085%. Растворы сравнивались с приготовленным специально для этого раствором с концентрацией 0,44%, строилась тарировочная кривая. Тарировка совершенно необходима, так как все окрашенные растворы следуют известному закону Бэра только при некотором разбавлении, а затем отклоняются от него.

Графа 2. Количество раствора Qt, для которого вычислялась концентрация C, определяется по делениям в мерном сосуде, установленном под водосливом.

Графа 3. Интервалы t между пробами определяются по секундомеру.

Графа 4. Количество удаленного из лотка основного окрашенного раствора рассчитывается по формуле

$$a = \frac{CQt}{4{,}4} \text{ см}^3.$$

Графа 5. Количество оставшегося в лотке основного раствора равно разности $A - \sum a$.

Графа 6. Средняя концентрация окрашенной жидкости в лотке $C_{ср}$ в пересчете на СО равна $\frac{A-a}{V}$ 4,4%. В начальный момент опыта

$$C_{ср} = C_н = \frac{A}{V} 4{,}4\%.$$

Графа 7. Коэффициент обмена в объеме всего лотка за истекшее с начала опыта время равен $\frac{Qt}{V}$.

Графа 8. Среднее значение коэффициента обмена между предыдущим и последующим значениями $\frac{Qt}{V}_{ср}$.

Осреднение необходимо для правильного построения экспериментальных кривых (рис. 2), так как $C_{ср}$ соответствует не $\frac{Qt}{V}$, а $\frac{Qt}{V}_{ср}$.

По экспериментальным кривым гидромоделирования нагнетательного проветривания определяется зависимость между начальной концентрацией $C_н$ и коэффициентом обмена $\frac{Qt}{V}$ (рис. 2). При малом расходе ВВ и большом объеме выработки $C_н$ может быть равной или даже меньше 0,008% — установленной для СО санитарной нормы. В этом случае процесс проветривания будет заключаться только в рассредоточении образовавшихся взрывных газов по выработке так, чтобы нигде не было скопления СО в концентрациях, превышающих санитарную норму. Коэффициент обмена при этом может оказаться меньше единицы.

На рис. 2 построена кривая зависимости $C_н = f\left(\frac{Qt}{V}\right)$. По данным опытов она получила вид

$$C_н = 0{,}0088\left(\frac{Qt}{V}\right)^2 \tag{5}$$

или более точно

$$C_н = 0{,}0072\, e^{0{,}745\frac{Qt}{V}} - 0{,}072.$$

Заменяем $C_н$ через

$$\frac{B \cdot 0{,}04}{V} 100 = \frac{4B}{V},$$

где B — расход взрывчатых веществ, *кг*;

0,04 — количество СО, выделяющееся при взрывании 1 *кг* ВВ, *м*³.

Решая (5) относительно Q, имеем

$$Q = \frac{21{,}4}{t}\sqrt{BV}.$$

Описанные опыты без ущерба для точности упрощаются до выполнимых в любых условиях. Для этого отмеряют необходимое количество основного окрашенного раствора A *см*³. После установления необходимого расхода промывочной воды (расход в этом случае можно определять приближенно, так как в дальнейших расчетах он не учитывается) близ забоя выливают основной раствор и одновременно под водослив подставляют большой мерный сосуд, куда стекает раствор за все время опыта.

Пробы окрашенной жидкости не берут и изменение концентрации раствора не определяют.

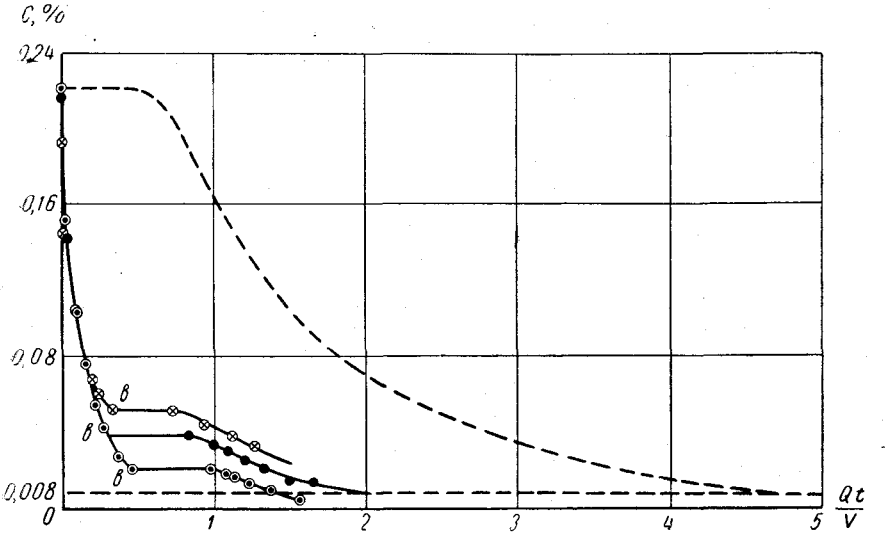


Рис. 3. Изменение средней концентрации окрашенного раствора при комбинированном проветривании одним вентилятором:

в — момент реверсии вентилятора.

Окончание «проветривания» устанавливают визуально по посветлению раствора в лотке (для сравнения можно иметь приготовленный раствор $KMnO_4$ с вышеуказанной концентрацией 0,0085%). В этот момент мерный сосуд отставляют и измеряют общее количество чистой воды Qt, прошедшей через лоток за время опыта. Измеряют объем воды V, находящейся в лотке.

По полученным данным определяют $C_н = \frac{A}{V}$ 4,4% и конечное значение $\frac{Qt}{V}$. Изменяя с каждым опытом количество раствора A, получают необходимые значения $C_н$ и $\frac{Qt}{V}$ для построения кривой $C_н = f\left(\frac{Qt}{V}\right)$. Затем находят эмпирическую формулу полученной кривой, а после замены $C_н$ на $\frac{nB}{V}$ 100 (n — количество CO, образующейся при взрывчатом разложении 1 *кг* ВВ, которое в общем случае может быть различным, в зависимости от рода ВВ и условий взрывания) — расчетную формулу. Таким образом, можно выяснить количественные соотношения при нагнетательном проветривании не только глухих забоев, но и камер, лав и других сквозных выработок.

При всасывающем проветривании (рис. 1, *б*) режим опыта устанавливается так, чтобы расход чистой воды, поступающей по трубке *5*, превышал количество жидкости, вытекающей из трубки *8*, отрегулированной зажимом *9*. В остальном опыт проводится так же, как и при нагнетательном проветривании.

Гидромоделирование применено нами для получения расчетных формул не только по нагнетательному и всасывающему способам проветривания, но и по комбинированному, осуществляемому одним вентилятором, который первоначально работает на всасывание, а затем реверсируется и рассредотачивает оставшиеся газы по выработке, нагнетая воздух в забой. Кривые рис. 3 показывают, как сильно зависит эффективность проветривания от соотношения между временем всасывания и нагнетания (Q в этих опытах равны). Кривая изменения концентрации при простом нагнетательном проветривании (на рис. 3 помечена пунктиром) свидетельствует о значительно меньшей эффективности этого способа по сравнению с комбинированным. Этим же методом исследовалось проветривание шахтных стволов при проходке, а также проветривание камер применительно к Соликамскому калийному руднику (1947 г.).

Круг вопросов, которые могут быть решены при помощи гидромоделирования, достаточно широк. Внедрение гидромоделирования в практику лабораторных исследований процессов вентиляции принесет несомненную пользу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Лабораторные исследования процессов вентиляции горных выработок для получения количественных зависимостей целесообразно проводить на гидромоделях, заменяя вредные газы, подлежащие вымыванию из забоев выработок, окрашенной жидкостью или иными растворами, и наблюдая изменение концентрации при помощи колориметра, фотоэлементов или другими способами.

2. Для сохранения подобия исследуемых процессов необходимо в модели масштаба $1 : m$ сохранить геометрическое подобие, а количество воды и растворов, имитирующих чистый и загрязненный воздух, уменьшить в m^3 раз. В этом случае время проветривания выработки в натуре t_1 и время очистки модели от растворов t_2 будут равны, как и коэффициенты обмена $\frac{Qt}{V}$ модели и выработки.

3. Соблюдение равенства чисел Рейнольдса в натуре и модели ухудшает общее подобие процессов, так как приводит к нарушению масштаба количества промывочной воды и скорости, совершенно искажает роль диффузии в процессе проветривания, значительно сокращает время очистки модели от растворов и дает заниженные значения $\frac{Qt}{V}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Швырков И. А. Проветривание глухих забоев после паления. Безопасность труда в горной промышленности, 1934, № 5 — 6.

2. Скочинский А. А., Воронов П. И., Ольвовский М. М. Процессы удаления вредных газов из глухих забоев. Сб. научных трудов МГИ, 1937, вып. 3.

3. Ксенофонтова А. И., Берман Л. Ю. Методы подсчета количеств воздуха для проветривания рудников. Изд-во АН СССР, 1941.

4. Мустель П. И. Определение количества воздуха, необходимого для проветривания глухих забоев после взрывания шпуров, на гидромоделях. Канд. дисс. Фонды ЛГИ, 1943.