

статье не исследовалась калибровка теплофизической модели на разные моменты времени, а следовательно, нельзя утверждать о надежности выбранных решений в плане прогноза.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы ФНИ,
проект № 0422-2019-0145-С-01 (регистрационный номер темы НИОКТР:
АААА-А18-118040690029-2).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балк П.И., Долгаль А.С., Балк Т.В., Христенко Л.А. Согласование конкурирующих вариантов интерпретации гравитационных аномалий методом минимизации эмпирического риска // Геоинформатика. – 2015. – № 4. – С. 24-35.
2. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – 2009. – 232 с. – URL: <http://www.sigma3d.com/pdf/books/blokh-2009.pdf>.
3. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 1. – С. 172-184.
4. Паршаков О.С. Разработка автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений: дис. ... к.т.н.; 25.00.20 / Паршаков Олег Сергеевич. – Пермь, 2020. – 140 с.
5. «Frozen Wall»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2018666337 / Богомяков А.В., Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А.; заявитель и правообладатель ПФИЦ УрО РАН. – 2018663501; заявл. 28.11.2018; зарегистрировано 17.12.2018; опубл. 17.12.2018. – 1 с.
6. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Контроль и прогноз формирования ледопородного ограждения с использованием оптоволоконных технологий // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 236-238.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2020.3.25

ВЗАИМОСВЯЗЬ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ, МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Г.З. Файнбург, М.А. Семин, А.Г. Исаевич
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассматривается взаимосвязь механизмов массопереноса в рудничной атмосфере, математических моделей их аналитического описания и технических способов проветривания тупиковых горных выработок. Методами математического моделирования показано, что реальный процесс проветривания происходит медленнее, чем это описывается моделью идеального смешения, поскольку в структуре воздушных протоков сосуществуют отдельные вихри и застойные зоны с пониженным массообменом с другими потоками.

Ключевые слова: идеальное вытеснение, идеальное смешение, математическая модель, тупиковая выработка, способ проветривания.

Введение

Тупиковые горные выработки являются, с одной стороны, неотъемлемой частью горных работ, а с другой стороны, представляют собой для проветривания гораздо более сложный случай, чем проветривание сквозных выработок. Согласно правилам безопасности [1] в тупиковых забоях длиной более 10 м необходимо осуществлять принудительное проветривание с помощью вентилятора местного проветривания (ВМП), расположенного на сквозной воздушной струе, и вентиляционного трубопровода, про-

ложенного от ВМП до забоя с отставанием не более 10 м. Тем самым предписывается применять нагнетательный способ проветривания, что, как показывает практика, не оптимально для комбайновой выемки и высоких скоростей подвигания забоя, характерных, например, для калийных рудников. На начальное время проходки тупиковой выработки возможно использование сил плавучести и турбулентной диффузии [2–5]. Это же возможно при больших сечениях тупиковой выработки [9].

Известно, что традиционно выделяют два основных способа принудительного проветривания тупикового забоя: нагнетательный и всасывающий [2, 7, 10]. Характерные особенности буровзрывного способа проходки (сила взрывной волны, разлет кусков руды, повреждающих оборудование, уходка груди забоя на при каждом отпале, образование горячих токсичных отпалочных газов, относительная технологическая простота доставки свежего воздуха по мягкому трубопроводу и значительная длина деятельной струи) вызвали доминирование нагнетательного способа проветривания на шахтах и рудниках в эпоху доминирования взрывной отбойки.

Стремление к повышению производительности труда требовало, чтобы проветривание после взрывных работ не тормозило весь процесс проходки. Если время такого проветривания укладывалось в межсменный перерыв, это было приемлемо, а если нет – то необходимо было что-то менять. Проблемы при применении нагнетательного способа проветривания в первую очередь возникали в длинных (порядка километра) разведочных или подготовительных выработках, когда относительно быстро вытесненные из забоя отпалочные газы длительное время двигались по выработке, препятствуя доступу людей [2, 7, 10].

В этих условиях более выгодно становилось применение всасывающего способа проветривания с жесткими трубами, особенно, если темпы проходки были низки, а длина выработки значительна. Однако проветривание самого забоя шло медленно, в нем образовывались застойные зоны, которые представляли собой потенциальную опасность.

Более хорошие результаты дало применение комбинированного способа проветривания, когда забой проветривается по схеме нагнетательного проветривания, а затем вытесненные из него примеси подхватываются и удаляются всасывающим способом [7]. В целом выработка проветривается по схеме всасывающего проветривания, а нагнетательный способ проветривания самого забоя выступает скорее как турбулизатор загрязненного воздуха у груди забоя, вытесняя его своей струей (чистой или грязной) к всасывающему трубопроводу. Удаление местонахождения последнего от груди забоя делает технологически осуществимым установку ВМП в тупиковой выработке и применение мягких труб.

Смена технологии проходки с буровзрывной на комбайновую [8] настолько существенно меняет характер загрязнения воздуха и характер самого проветривания, что ставит вопрос о научно обоснованном выборе способа проветривания. Последний зависит от многих причин (в том числе и чисто юридического характера), но с научной точки зрения он зависит от физических механизмов распространения примесей в рудничной атмосфере и от математических моделей из описания, дающих понимание инженерам, как следует организовать эффективное проветривание, какой способ применить.

Механизмы и модели переноса массы в рудничной атмосфере

Движение воздуха и содержащихся в нем вредных примесей в атмосфере горных выработок является результатом действия двух основных механизмов переноса – механизма вытеснения/замещения одного объема воздуха другим без изменения их свойств и механизма смешения/перемешивания этих объемов с изменением их свойств и образованием некоего третьего объема с другими свойствами. Эти процессы макропереноса

дополняются молекулярной диффузией, работающей на микроуровне отдельных молекул и их кластеров [11].

Описание этих процессов может быть продемонстрировано традиционно часто используемым в рудничной аэрологии классическим одномерным уравнением конвективно-диффузионного переноса C (концентрации вредной примеси) [11]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + q \quad (1)$$

где U – скорость потока, как правило, средняя по расходу, м/с; t – временная координата, с; D – эффективный коэффициент диффузии, в данном случае объединяющей молекулярную и турбулентную диффузии, а также Тейлоровскую дисперсию, x – пространственная координата вдоль горной выработки, м; q – источник (сток) примеси, ед. примеси/с.

Второе слагаемое слева отвечает за конвективное (адвективное) вытеснение, а слагаемое справа – за перемешивание, которое может иметь различную природу.

Загрязняющие рудничную атмосферу примеси находятся в «элементе» воздушной среды и переносятся им. Непрерывное взаимодействие этих элементов, участвующих в интенсивном вихревом движении, с помощью молекулярного и турбулентного массообмена приводит к снижению градиентов концентрации примесей, к локальному выравниванию содержания примесей [6]. С макроскопической точки зрения кажется, что происходит смешивание более «чистых» и более «грязных» элементов воздушной среды. Эти процессы обуславливают эффективно смешивание элементов воздушных потоков и размешивание/разжижение вредной примеси.

Процессы вытеснения и смешивания являются основными физическими процессами проветривания, а управление ими позволяет управлять проветриванием в целом. Противоположность и взаимное дополнение этих двух процессов позволяет выделить и две основные модели переноса воздухом тех или иных примесей. Именно с этой точки зрения и формулируются математические модели идеального вытеснения или идеального перемешивания.

Конвективный перенос массы в рудничной атмосфере в большинстве случаев является основным и может быть описан в рамках модели идеального (поршневого) вытеснения в полном пренебрежении перемешивания. Такое перемешивание, например, за счет молекулярной и турбулентной диффузии, а также тейлоровской дисперсии всегда есть, но его роль может быть очень мала, следовательно, модель может максимально соответствовать описываемому механизму.

В некоторых локальных участках шахтных и рудничных вентиляционных сетей (например, тупиковых забоях) более выраженным может быть механизм перемешивания. Модель идеального перемешивания в стационарном случае описывается алгебраическим уравнением, и это делает ее применение элементарным и удобным, поэтому она «доминирует» на практике над моделью идеального вытеснения. В рудничной вентиляции модель идеального перемешивания для постоянных, стационарных, условий чаще называют моделью «статического разжижения» [2, 10].

Важно отметить, что строгое описание механизма перемешивания в чистом виде не может быть сделано в рамках теории проветривания, ибо реальные процессы, обеспечивая доминирование механизма перемешивания, тем не менее, формируются за счет замещения одних (загрязненных) объемов воздушной среды другими (свежими), и роль этого замещения, составляющего смысл проветривания, достаточно весома. Истинно идеальное перемешивание без вытеснения реализуется лишь в замкнутых объемах без поступления свежего воздуха, когда часть воздушной среды оказывается загрязненной,

а часть – нет. Поэтому используемая в противовес модели идеального вытеснения модель идеального перемешивания основана и на обоих механизмах. Во-первых, на механизме перемешивания, который формально математически никак не описывается, но фиксируется одной, средней по объему концентрацией C (что может быть достигнуто только перемешиванием), и на механизме вытеснения, описываемом притоком свежего воздуха Q [14].

В рамках модели идеального (поршневого) вытеснения считается, что весь загрязненный воздух вытесняется без перемешивания из горной выработки. Это вытеснение длится некоторый период времени $t_{ив}$, равный:

$$t_{ив} = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

где V – объем выработки, m^3 , занятый вытесняемым воздухом, загрязненным или не загрязненным, Q – расход свежего воздуха, подаваемый в выработку, m^3/c . Это время, как легко понять, является минимально возможным и самым эффективным, поскольку позволяет вытеснить без перемешивания весь загрязненный воздух.

Такая модель хорошо работает для протяженных (штрекообразных) выработок с постоянным или слабо и медленно меняющимся сечением, не позволяющим образовываться застойным зонам. Если ввести сечение выработки S , m^2 , и длину выработки L , m , то $t_{ив} = L/U$, где U – средняя по сечению (по расходу) скорость потока, m/c . Заметим, что такое время в радиационной безопасности часто называют временем пребывания, ибо именно это время в выработке находится (пребывает) загрязнитель.

В рамках модели идеального перемешивания проветривание, строго говоря, длится бесконечно долго, все время размешивая и размешивая остатки загрязнителя. На практике время идеального перемешивания $t_{ип}$ для проветривания горной выработки определяют исходя из гигиенических критериев достижения некоторой «конечной» концентрации примеси. Это условие чаще всего реализуется через требование того, чтобы в выработку поступил такой объем свежего воздуха $Qt_{ип}$, которого достаточно для разбавления и вытеснения разбавленной смеси со средней концентрацией C от начальной концентрации загрязнителя C_0 до предельно-допустимой концентрации (ПДК) $C_{пдк}$:

$$t_{ип} = \frac{V}{Q} \ln \left(\frac{C_0}{C_{пдк}} \right) \quad (3)$$

Такой подход, как показала практика, хорошо соответствует реальности, особенно для камерообразных выработок или призабойной зоны тупиковой выработки, где размеры сечений соотносятся с длиной выработки или зоной проветривания [14].

Моделирование и обсуждение результатов

Расчеты динамики проветривания проводили аналитически или численно в рамках двумерной модели турбулентной диффузии. Характерные временные зависимости концентрации вредных примесей в безразмерных координатах в рамках каждого из двух вышеперечисленных подходов представлены на рис. 1 – рис. 2. Представлены временные зависимости как средних (рис. 2), так и максимальных (рис. 1) концентраций вредной примеси.

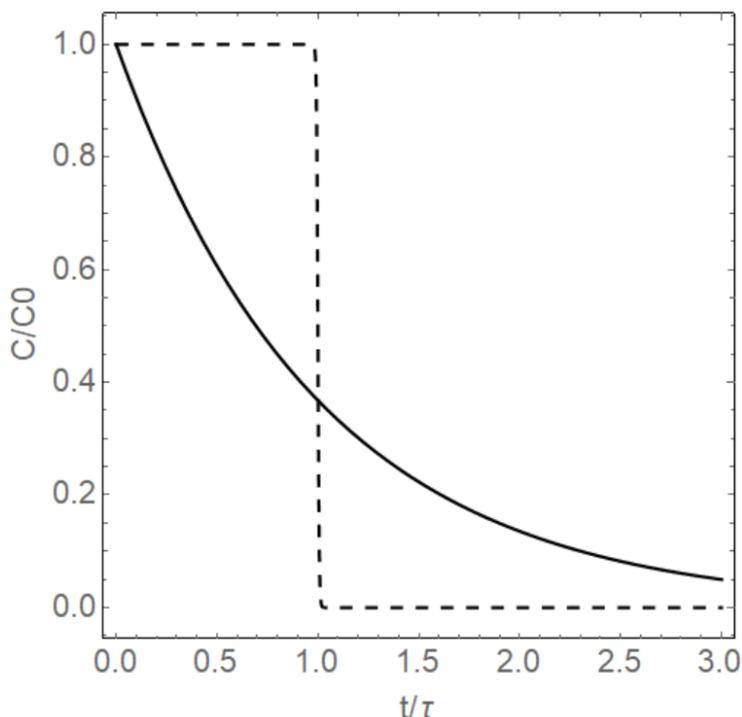


Рис. 1. Зависимости максимальной безразмерной концентрации загрязнителя от безразмерного времени проветривания горной выработки, сплошная линия – модель идеального перемешивания, штриховая линия – модель идеального вытеснения

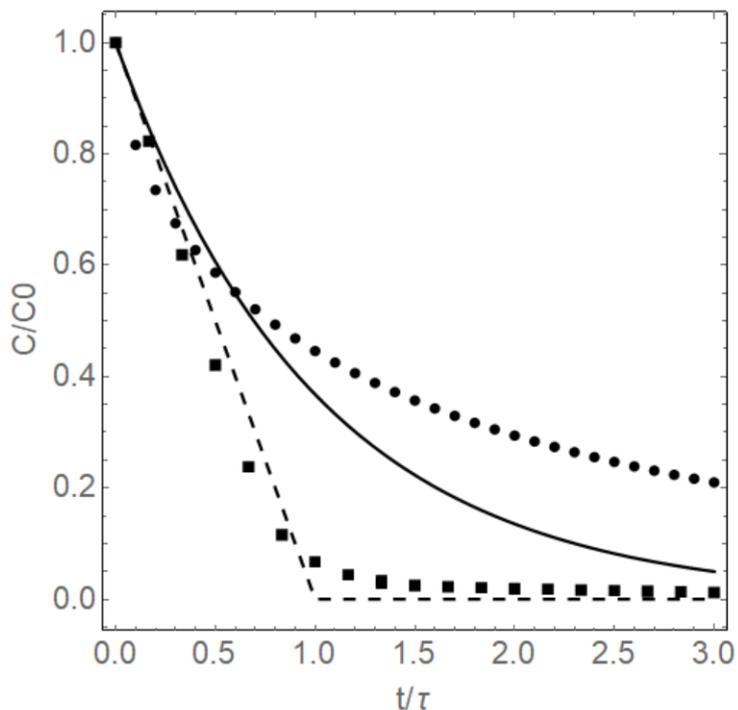


Рис. 2. Зависимости средней по проветриваемому объему безразмерной концентрации газа от безразмерного времени проветривания горной выработки, сплошная линия – идеальное перемешивание, штриховая линия – идеальное вытеснение, точки – результаты численного моделирования

Красной пунктирной линией отмечена линия ПДК. В качестве характерного времени τ , по которому производился расчет безразмерного времени, принималась величина:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

Из данных рис. 1 и рис. 2 следует, что в модели идеального перемешивания средняя и максимальная концентрации загрязнителя в объеме не различаются (они совпадают), поскольку предполагается, что происходит перемешивание смеси до однородного состояния. Для модели идеального вытеснения ситуация другая – средняя по всему объему выработки, и загрязненному до проветривания и чистому после проветривания и максимальная концентрация в загрязненной части различны. Первая все время меняется по линейному закону, а вторая – постоянна.

На рис. 2 точками отмечены результаты численного моделирования проветривания тупиковой горной выработки при наличии в ней в начальный момент времени однородного распределения вредных примесей в области 10 м вблизи груди забоя. Численные расчеты проводились в двумерной постановке в пакете Ansys Fluent. Анализ численных результатов проводился только для зависимости средней по проветриваемому объему безразмерной концентрации от безразмерного времени проветривания горной выработки.

Из рис. 2 видно, что численная кривая, соответствующая нагнетательному способу проветривания, имеет ярко выраженный экспоненциальный вид, что неудивительно, поскольку струя создает огромный вихрь перемешивания в тупиковой части забоя. Напротив численная кривая, соответствующая всасывающему способу проветривания, близка к прямой линии на временном отрезке $[0; 1]$, в то время как при больших временах $t > \tau$ близка к нулю, а ее незначительное изменение происходит по экспоненциальному закону. Результаты численного моделирования подтверждают тот факт, что при применении нагнетательного способа проветривания в тупиковой выработке преобладает механизм перемешивания, в то время как при применении всасывающего способа – механизм вытеснения.

Интересный результат получен при нагнетательном способе проветривания – рассчитанная численно средняя концентрация газа в тупиковой выработке убывает со временем медленнее, чем это предсказывает аналитическая модель механизма идеального перемешивания. Но это и не удивительно, идеального смешения нет в чистом виде, смешение доминирует, но оно не может выровнять концентрацию по всему объему забоя мгновенно. Существуют труднопроветриваемые и застойные зоны, это увеличивает время проветривания [12, 13]. Это означает, что для проветривания тупиковой выработки при нагнетательном способе существенную роль в реальности процессы перемешивания играют меньшую роль, чем это следует из модели идеального перемешивания. Легко реализуемая на практике потребность в большем количестве свежего воздуха связана с образованием в горной выработке застойных вихревых зон, имеющих слабый воздухообмен с основной воздушной струей,двигающейся от конца става вентиляционного трубопровода, омывающей тупиковый забой и покидающей горную выработку, не успев захватить с собой все примеси.

Поскольку в действительности в горных выработках реализуются одновременно оба механизма массопереноса (вытеснение и перемешивание), то реальная картина проветривания (соотношение вклада двух данных механизмов) будет также различной при разных типах горной выработки (тупиковая, сквозная, штрекообразная, камерообразная), способах проветривания (за счет общешахтной депрессии, нагнетательный, всасывающий, комбинированный) и других технологических параметрах системы вентиляции и системы разработки. Все это необходимо учитывать при организации проветривания тупиковых выработок на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 11.12.2013, № 32935. (с изм. на 21.11.2018 г. Редакция, действующая с 17.03.2019 г.) – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/499066482> (Дата обращения: 15.08.2020).
2. Воронин В.Н. Основы рудничной аэро-газодинамики. – М.; Л.: Углетехиздат, 1951. – 492 с.: ил.
3. Воронов П.И., Ольвовский М.М. Процессы удаления вредных газов из глухих забоев // Сборник научных трудов Московского Горного института / под ред. и с предисл. А.А. Скочинского. – М., 1937. – Вып. 3. – С. 105-161.
4. Карпов А.М. Естественное проветривание тупиковых выработок // Труды Новочеркасского политехнического института. – Новочеркасск, 1948. – Т. 16 (30). – С. 15-17.
5. Карпов А.М. Исследование пределов проветривания тупиковых выработок диффузией // Рудничная аэрология и безопасность труда в шахтах. – М., 1949. – С. 81-88.
6. Колесов Е.В. Разработка методики расчета количества воздуха, требуемого для проветривания тупиковых проходческих выработок после взрывных работ // Горное эхо. – 2019. – № 3 (76). – С. 80-84.
7. Комаров В.Б., Борисов Д.Ф. Рудничная вентиляция. – Л.; М.: ГОНТИ, 1938 – 454 с.
8. Левин Л.Ю., Исаевич А.Г., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горн. журн. – 2015. – № 1. – С. 72-75. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13.
9. Мальцев С.В., Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Семин М.А. Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 2. – С. 46-57. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57.
10. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. – 3-е изд. – М.: Углетехиздат, 1959. – 632 с.: ил.
11. Файнбург Г.З. Методы математического моделирования процессов тепломассопереноса в вентиляционных сетях шахт и рудников // Разработка соляных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. / ППИ. – Пермь, 1978. – С. 47-55.
12. Файнбург Г.З., Овсянкин А.Д., Красюк Н.Ф., Вайсман О.Я. Сравнительная оценка нагнетательного и всасывающего способов проветривания тупиковых комбайновых выработок калийных рудников // Разработка месторождений полезных ископаемых: сб. науч. тр. – Киев; Донецк, 1990. – Вып. 86. – С. 26-32.
13. Файнбург Г.З., Исаевич А.Г. Анализ микроциркуляционных потоков между микрizonaми в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3. – С. 58-73. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-58-73.
14. Швырков И.А. Проветривание глухих забоев после паления // Безопасность труда в горной промышленности. – 1934. – № 5, 6. – С. 5-12; С. 4-15.