

УДК 622.86: 622.272

А.М. ГОЛЫШЕВ, д-р техн. наук, проф., Э.В. СЕРЕБРЕННИКОВ канд. техн. наук, доц.
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»,
А.В. ДАВЫДОВ, ПАО «Евраз Суха Балка»,
Е.В. ПИЩИКОВА, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ В ТУПИКОВОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

Получено общее решение задачи о пространственно-временном распределении вредного газа в тупиковой горной выработке. Рассмотрен конкретный пример распространения СО после взрыва в условиях ПАО «Евраз Суха Балка»

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Одним из наиболее интенсивных источников выделения вредных веществ при проведении горных выработок являются взрывные работы. При их ведении в рудничную атмосферу поступает помимо пыли значительное количество ядовитых газов (оксиды углерода и азота), которые кроме непосредственного токсичного действия на горнорабочих усиливают развитие силикоза.

Ущерб, который наносят эти вредные газы здоровью горнорабочих в настоящее время можно оценить лишь косвенно путем сравнения фактических концентраций этих веществ в воздушной среде с предельно допустимыми величинами, установленными действующими нормами. Такой подход не дает в полной мере возможности достаточно точного определения последствий воздействия вредных факторов на здоровье человека. Целесообразно в этой связи получить количественную оценку ингаляционного воздействия на человека вредных веществ, применив для решения этой задачи концепцию риска. Для количественной оценки последствий воздействия вредных факторов производственной среды на жизнь и здоровье человека применяются различные математические модели.

Воздействия этих факторов производственной среды на производственный персонал получили обобщенное название «доза», а математические модели, дающие результаты этого воздействия - модели «доза-эффект». В качестве дозы, может рассматриваться количество поступивших в организм работника токсикантов, в число которых входят такие вредные газы как оксиды углерода и азота. В качестве аналитических зависимостей, отражающих связи между поглощенной дозой и ожидаемым эффектом (вероятностью последствий) применяются стохастические (вероятностные) математические модели, которые получили название пробит-функций *Pr*.

Поэтому в этой связи необходимо провести теоретические исследования распространения вредных газов в тупиковых выработках шахт.

Постановка задачи. Целью данной работы является изучение путей снижения профессионального риска отравления вредными газами при уборке горной массы после взрыва в условиях рудных шахт на основе теоретических исследований распространения вредных газов в тупиковой горной выработке.

Изложение материала и результаты. Из практики известно, что газовыделение происходит не только при взрыве, но и в последующем при уборке отбитой горной массы. Вредные газы, как правило, накапливаются в глухих выработках, в которых отсутствует или нарушена вентиляция.

На практике рассматриваются случаи ингаляционного воздействия вредных газов при постоянной концентрации вредного вещества

$$D = c^n t \quad (3)$$

где *c* - концентрация токсиканта, мг/м³, ppm; *t* - время экспозиции, мин; *n* - коэффициент, постоянный для каждого конкретного вещества.

Установлено, что изменение концентрации газообразной примеси будет иметь место не только во времени, но и по длине выработки. В связи с этим необходимо было выполнить аналитические исследования распространения газообразной примеси для такого специфического пространства, как, например, тупиковая горная выработка.

Расчетная область представляет собой внутреннюю часть полубесконечного параллелепипеда, схема которой представлена на рис. 1.

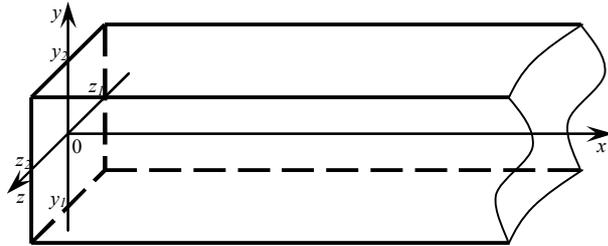


Рис. 1. Схема тупиковой горной выработки

Распределение концентрации по пространству и времени описывается уравнением конвективно-диффузионного переноса

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{U} \cdot \text{grad } C = D\Delta C + q_V, \quad (2)$$

где C - концентрация вредного газа, мг/м³; t - время, с; \bar{U} - вектор скорости воздушной

среды, м/с; D - коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; q_V - удельная интенсивность выделения массы вредного газа из объемного источника, мг/(м³·с).

Для математической постановки задачи к уравнению (2) необходимо добавить начальные и граничные условия, конкретизировать вид функции источника q_V и подставить в уравнение (2) вектор скорости \bar{U} , найденный из решения гидродинамической задачи для воздушного потока.

Начнем с рассмотрения граничных условий для боковых стенок тупиковой горной выработки. Поскольку конечной целью решаемой задачи является анализ пагубного воздействия вредных газов на организм горнорабочих, то естественно рассмотреть наихудший вариант граничного условия – полное отражение газа от стенки, когда он весь остается в пределах горной выработки.

Займемся теперь изучением функции источника q_V . Поскольку горные работы выполняются лишь в тупике горной выработки, то естественно считать, что источник вредного газа расположен в плоскости $x=0$ (см. рис. 1). Тогда функция q_V может быть записана в виде

$$q_V(x, y, z, t) = \delta(x)q_S(y, z, t),$$

где $\delta(t)$ - дельта-функция Дирака, 1/м; q_S - удельная интенсивность выделения массы вредного газа из площадного источника, мг/(м²·с).

Что же касается остальных исходных данных, необходимых для постановки задачи, то начальные условия при $t=0$ - однородные: $C=0$, т.е. нет фоновой концентрации вредного газа. Для начала будем считать, что вектор скорости воздушного потока $\bar{U} = 0$, т.е. выработка не проветривается.

Итак, математическая постановка задачи для расчета распределения концентрации вредного газа $C(x, y, z, t)$ в воздушной среде тупиковой горной выработки (рис. 2) выглядит следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + \delta(x)q_S(y, z, t), \\ C(x, y, z, 0) &= 0, \\ \frac{\partial C}{\partial y}(x, y_1, z, t) &= \frac{\partial C}{\partial y}(x, y_2, z, t) = 0, \\ \frac{\partial C}{\partial z}(x, y, z_1, t) &= \frac{\partial C}{\partial z}(x, y, z_2, t) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

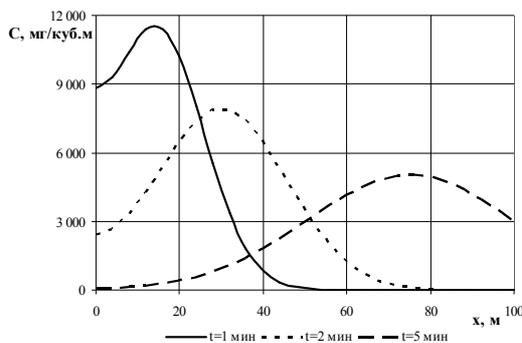


Рис. 2. Концентрация в зависимости от расстояния в заданный момент времени при проветривании

Существует несколько подходов к решению задачи (3). Во-первых, ее можно решать методом разделения переменных с последующим решением задачи Штурма-Лиувилля по определению собственных функций. Во-вторых, можно получить фундаментальное решение для полупространства $x \geq 0$, а затем преобразовать его в решение для полубесконечного параллелепипеда (рис. 1) методом отражений. В обоих случаях решение получается в виде

двукратных бесконечных рядов, является громоздким и неудобным для практического исполь-

зования.

Однако, процесс построения решения и его окончательный вид можно существенно упростить, если учесть, что продольный размер тупиковой горной выработки значительно превышает поперечные. При этом задача (3) может быть приближенно сведена к одномерной по пространственной координате x .

Уточним постановку этой задачи. Необходимо найти распределение концентрации вредного газа $C(x,t)$ в воздушной среде тупиковой горной выработки, которая представляется теперь в виде полупрямой. (3) принимает простой вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \delta(x)q_S^{cp}(t); \quad C(x,0) = 0, \quad (4)$$

где q_S^{cp} - средняя по сечению удельная интенсивность выделения массы вредного газа из площадного источника, мг/(м²·с).

Вернемся теперь к случаю, когда в выработке может быть вентиляция, т.е. $\bar{U} \neq 0$. Поскольку задача сведена к одномерной, то поперечные компоненты скорости $V=W=0$. (4) принимает форму

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \delta(x)q_S^{cp}(t), \quad (5)$$

$$C(x,0) = 0.$$

Уравнение неразрывности, записанное в интегральном виде

$$US = \text{const} \quad (6)$$

где $S = \text{const}$ - площадь поперечного сечения выработки, м², оставляет для определения продольной компоненты скорости U единственную возможность: $U = \text{const}$. Теперь эта компонента приобретает смысл средней по сечению выработки скорости.

Наконец, решение задачи (5) легко получить методом функции Грина [2]. При ее построении используется метод отражения относительно точки $x=0$, с учетом наилучшего для проветривания условия непроницаемости торцевой стенки выработки для вредного газа. Функция Грина $G(x,t,\xi,\tau)$ дает решение задачи (5)

$$q_S^{cp}(t) = \delta(t), \quad (7)$$

где $\delta(t)$ - дельта-функция Дирака, 1/с. Она имеет вид

$$G(x,t,\xi,\tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi D(t-\tau)}} \times \left(\exp\left(-\frac{((x-\xi)-U(t-\tau))^2}{4D(t-\tau)}\right) + \exp\left(-\frac{((x-\xi)+U(t-\tau))^2}{4D(t-\tau)}\right) \right), \quad (8)$$

где ξ, τ - пространственная и временная переменные для функции источника, м и с соответственно. Общее решение линейного уравнения для произвольной функции источника $q(x,t)$ строится на основе принципа суперпозиции [1]

$$C(x,t) = \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} G(x,t,\xi,\tau) q(\xi,\tau) d\xi d\tau. \quad (9)$$

Однако в нашем случае - для задачи (5), функция источника имеет специальный вид

$$q(x,t) = \delta(x)q_S^{cp}(t), \quad (10)$$

который позволяет упростить решение. (9) с учетом (10) принимает форму

$$C(x,t) = \int_0^t G(x,t;0,\tau) q_S^{cp}(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Теперь можно упростить функцию Грина (8)

$$G(x,t;\tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi D(t-\tau)}} \times \left(\exp\left(-\frac{(x-U(t-\tau))^2}{4D(t-\tau)}\right) + \exp\left(-\frac{(x+U(t-\tau))^2}{4D(t-\tau)}\right) \right), \quad (12)$$

Окончательное решение задачи (5)

$$C(x,t) = \int_0^t G(x,t;\tau) q_S^{cp}(\tau) d\tau, \quad (13)$$

где $G(x,t;\tau)$ определяется по формуле (12).

Рассмотрим один из типичных источников газовой выделения в тупиковой горной выработке - взрыв. Взрыв является очень кратковременным процессом, и при идеализации можно принять, что он происходит мгновенно. Тогда, считая, что взрыв произошел в момент времени $t=0$

$$q_S^{\text{вп}}(t) = M\delta(t), \quad (14)$$

где M - средняя масса газа, выбрасываемого при взрыве с единицы площади торца выработки, мг/м².

Решение (13) с учетом (14) имеет вид

$$C(x, t) = \frac{M}{2\sqrt{\pi Dt}} \left(\exp\left(-\frac{(x-Ut)^2}{4Dt}\right) + \exp\left(-\frac{(x+Ut)^2}{4Dt}\right) \right). \quad (15)$$

Перейдем к рассмотрению конкретного примера.

Опыт показывает, что коэффициент турбулентной диффузии на пять порядков превосходит коэффициенты ламинарной диффузии для большинства газов, и составляет примерно 1 м²/с [2]. Типичная длина выработки - 100 м. Для решения задачи о взрыве необходимо знать массу вредного газа, выбрасываемого с единицы площади торца выработки M . Принимаем площадь 10 м². Одним из наиболее вредных газов, образующихся при взрыве, является угарный газ СО. По данным [3], достоверно такое максимальное значение: 60 л/кгВВ для СО. Масса ВВ - 64 кг. Плотность СО - 1,15 кг/м³. Путем элементарных вычислений находим, что при взрыве выделяется 4,416 кг СО 30 % газа остается в породе. Таким образом, M равно $3,09 \cdot 10^5$ мг/м². После взрыва выработка проветривается со средней скоростью $U=0,25$ м/с.

Графическое представление вычислений по формуле (15) с использованием приведенных численных значений см. на рис. 2.

Анализ графиков говорит о высоких значениях концентрации СО (порядка сотен ПДК). Однако газовое облако быстро выносится из выработки, рассеиваясь при этом.

Таким образом, в проведенном теоретическом исследовании было получено общее решение задачи о пространственно-временном распределении вредного газа в тупиковой горной выработке и рассмотрен конкретный пример распространения СО после взрыва, что позволит применить количественный подход и с высокой степенью объективности оценивать профессиональные риски в области охраны труда, сравнивать их с нормативными и при необходимости, принимать меры по их снижению, как на стадии проектных работ, так и для условий действующего производства.

Список литературы

1. А.Н. Тихонов, А.А. Самарский Уравнения математической физики, М.: Наука, 1966. – 724с.
2. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика, Т.1. – М.: Наука, 1965. – 640с.
3. Янов А.П., Ващенко В.С. Защита рудничной атмосферы от загрязнения, М.: Недра, 1977. – 263с.

Рукопись поступила в редакцию 17.04.12

УДК 622.733:622.774913.1:622.765

М.О. ОЛЕЙНИК, С.В. МИХНО, аспиранты
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТОПОЛОГИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОБОГАЩЕНИЯ ТИТАНОМАГНЕТИТОВОЙ РУДЫ КОРЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ УКРАИНЫ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Сложные технологические схемы обогащения комплексного титановых руд коренных месторождений имеют разную направленность, а их надежность в общем случае количественно определяется совокупностью показателей или характеристик надежности для каждого из этих направлений и определяет обобщенную оценку эффективности обогатительного производств. Поэтому, одним из важнейших направлений повышения эффективности комплексной технологии является сохранение основных технических характеристик процессов в течение эксплуатации технологического решения на основе использования таких методов надежности топологии схемы, как: