

УДК 622.41:622.822

А.Л. Иванников, к.т.н, доц., МГГУ, В.В. Ковалишин, д.т.н., доц., ЛГУ БЖД

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНЕРТИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПОЖАРАХ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ И ТУННЕЛЯХ С ЛИКВИДАЦИЕЙ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ

Рассмотрены процессы газообмена в горных выработках и туннелях при пожарах и внезапных выделениях метана. Предложена модифицированная схема расчёта с центральными разностями. Разработана программа моделирования на ЭВМ формирования газодинамических процессов при подаче инертных газов и восстановлении нормального режима вентиляции. В качестве примера рассмотрен процесс газообмена в тупиковой выработке заполненной метаном до определённой концентрации при постоянно действующем источнике газовыделения и восстановлении режима вентиляции.

**Ключевые слова:** горная выработка, туннель, инертные газы, метан, концентрация, газообмен, численный метод, моделирование.

**Постановка проблемы.** Для тушения пожаров в горных выработках и туннелях применяют хладон, азот, двуокись углерода [1, 2] и др. При этом возникают такие вопросы, как время и интенсивность подачи в зависимости от протяжённости и поперечных размеров пожарного объекта, длительность тушения и режим вентиляции. Появление высоких концентраций метана вблизи очага горения создаёт угрозу взрыва и представляет большую трудность в ликвидации подобного вида аварий.

**Анализ последних исследований и публикаций** показал, что, несмотря на глубокую изученность процессов конвективно-диффузионного переноса газов в протяжённых объектах остаются нерешёнными вопросы численных методов расчёта концентраций различных газов при произвольных функциях их выделения и переменном расходе воздуха.

**Цель работы** – исследование нестационарных процессов газораспределения с источниками в горных выработках и туннелях при различных режимах вентиляции.

### **Материалы исследований.**

При исследовании процессов нестационарного переноса газа в горных выработках и туннелях используем уравнение одномерной конвективной диффузии в консервативном виде, полученное при интегрировании по сечению выработки уравнения диффузии в трёх измерениях [3]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + i(x,t), \quad (1)$$

где  $C$  – средняя по сечению выработки долевая концентрация газа;  $u$  – переменная по длине и во времени скорость воздуха, м/с;  $D_x$  – коэффициент турбулентной диффузии газа, м<sup>2</sup>/с;  $i$  – интенсивность источников газовыделения в поток, м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·с);  $x$  – продольная вдоль выработки координата, м;  $t$  – время, с.

Дифференциальное уравнение (1), в отличие от уравнения, где скорость воздуха вынесена за знак производной [4], является «консервативным» [5], так в этом случае не нарушается закон сохранения массы, в чём можно убедиться, рассматривая стационарный случай. Тогда, пренебрегая диффузией, после интегрирования получим

$$C(x) = \frac{S \int_0^x i dx}{uS}, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения выработки,  $m^2$ .

Очевидно, решение (2) выражает закон сохранения массы, как отношение суммарного дебита газа к расходу воздуха.

Естественно, что при произвольных функциях газовой выделенности и переменном расходе воздуха невозможно получить аналитическое решение задачи. Поэтому применим далее интегральный метод для нахождения численного решения задачи [4]. Выберем область интегрирования  $l$  согласно рис.1 для интегрального метода.

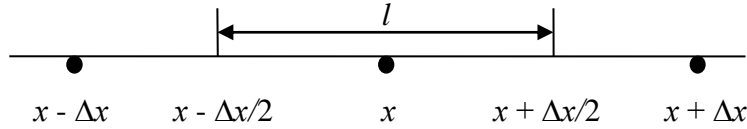


Рисунок 1 – Область интегрирования для интегрального метода.

Пользуясь теоремой о среднем, представим уравнение (1) в конечных разностях

$$\frac{C_x^{t+\Delta t} - C_x^t}{\Delta t} + \frac{(uC)_{x+\Delta x}^t - (uC)_{x-\Delta x}^t}{2\Delta x} = (1-p)D_x \frac{(C_{x-\Delta x}^t - 2C_x^t + C_{x+\Delta x}^t)}{\Delta x^2} + pD_x \frac{C_{x-\Delta x}^{t+\Delta t} - 2C_x^{t+\Delta t} + C_{x+\Delta x}^{t+\Delta t}}{\Delta x^2} + \bar{i}_x^t, \quad (3)$$

где  $\Delta x$  – шаг по пространственной координате, м;  $\Delta t$  – шаг по времени, с;  $p$  – удельный вес неявной схемы.

В отличие от [5] полученная схема расчёта концентрации газа является комбинированной с удельным весом  $p$  неявной схемы. При расчёте по длине выработки или туннеля слева направо неизвестной является только концентрация газа в передней точке  $C_{x+\Delta x}^{t+\Delta t}$ , которую можно найти при  $p = 0$  и, подставляя полученное значение в формулу (3), определить искомое значение  $C_x^{t+\Delta t}$  для всех точек на всех слоях по времени. В результате комбинированная схема превращается в явную схему и имеет вид

$$C_x^{t+\Delta t} = \frac{1}{1+2pPe} \{ C_x^t + [(\bar{u}C)_{x-\Delta x}^t - (\bar{u}C)_{x+\Delta x}^t]Cu/2 + (1-p)(C_{x-\Delta x}^t - 2C_x^t + C_{x+\Delta x}^t)Pe + [C_{x-\Delta x}^{t+\Delta t} + C_{x+\Delta x}^t + [(\bar{u}C)_x^t - (\bar{u}C)_{x+2\Delta x}^t]Cu/2 + (C_x^t - 2C_{x+\Delta x}^t + C_{x+2\Delta x}^t)Pe + \bar{i}_{x+\Delta x}^t ]pPe + \bar{i}_x^t \}. \quad (4)$$

где  $Cu = \frac{|u_{\max}| \Delta t}{\Delta x}$  – схемное число Куранта [5];  $Pe = \frac{D_x \Delta t}{\Delta x^2}$  – схемное число Пекле [5];

$\bar{u} = u/|u_{\max}|$  – относительная скорость;  $\bar{i} = i\Delta t$  – относительная интенсивность газовой выделенности.

Анализ предлагаемой расчётной схемы (4) показывает, что условием устойчивого счёта является требование

$$Cu < 1; \quad Pe < 1/2. \quad (5)$$

Исходя из отношения критериальных чисел, найдём необходимый при расчётах шаг по длине выработки:

$$\frac{Cu}{Pe} = \frac{|u_{\max}| \Delta x}{D_x}, \quad (6)$$

откуда получим

$$\Delta x = \frac{Cu}{Pe} \frac{D_x}{|u_{\max}|}. \quad (7)$$

В ряде работ [2, 4] коэффициент турбулентной диффузии связывают со скоростью движения воздуха. Так, примем согласно [4] коэффициент турбулентной диффузии равным

$$D_x = 4,43(ud)^{2/3} \quad (8)$$

где  $d$  – диаметр выработки, м.

В практическом диапазоне диаметров и скоростей воздуха на рис. 2 представлены результаты расчётов по формуле (8) и по линейной зависимости

$$D_x = 3ud. \quad (9)$$

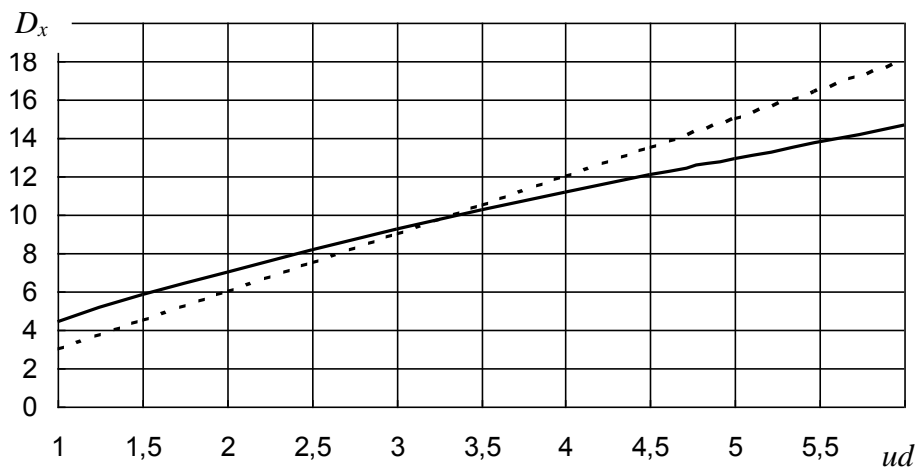


Рисунок 2 – Результаты сравнения степенной (сплошная линия) и линейной зависимости (штриховая линия) коэффициента турбулентной диффузии от скорости воздуха.

Как установлено, в диапазоне скоростей  $u = 0,5 - 3$  м/с и диаметров выработки  $d = 2 - 3$  м максимальная погрешность расчётов по формуле (9) менее 20 %. Поэтому подставляя (9) в (7) получим удобную формулу для расчёта шагов по длине выработки

$$\Delta x = 3 \frac{Cu}{Pe} \sqrt{S}. \quad (10)$$

Здесь диаметр выработки  $d$  выражен через площадь  $S$  её поперечного сечения:  $d \approx \sqrt{S}$ . Полученная формула (10) позволяет определить и шаг по времени при численном моделировании переходных газодинамических процессов. Так, выражая шаг по времени через число Куранта и используя (10), найдём

$$\Delta t = 3 \frac{(Cu)^2 \sqrt{S}}{Pe |u_{\max}|} \quad (11)$$

Входящие в формулы (10) и (11) числа Куранта и Пекле должны заранее выбираться из условия (5) устойчивости расчётной схемы (4). В соответствии с предложенной модифицированной схемой (4) с центральными разностями разработана программа расчёта на ЭВМ формирования газовых режимов при различных нарушениях режимов вентиляции и дегазации.

Для проверки точности разработанного метода «Медведица» на шеститочечном шаблоне рассмотрим пример загазирования и разгазирования выработки или туннеля при действии в течение некоторого времени источника газовыделения в каком-либо месте. В этом случае начальным и граничными условиями будут условия:

$$1) C(x_1, t) = 1 \text{ до } t_1; \quad 2) \frac{\partial C(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial C(L, t)}{\partial x} = 0, \quad (12)$$

где  $x_1$  – место действия источника газовыделения, м;  $L$  – длина выработки или туннеля, м;  $t_1$  – время действия источника газовыделения, с.

На рис. 3 представлены результаты моделирования движения газовой волны по потоку воздуха при подаче инертного газа в течение 500 с расположенного на расстоянии  $x_1 = 0$ .

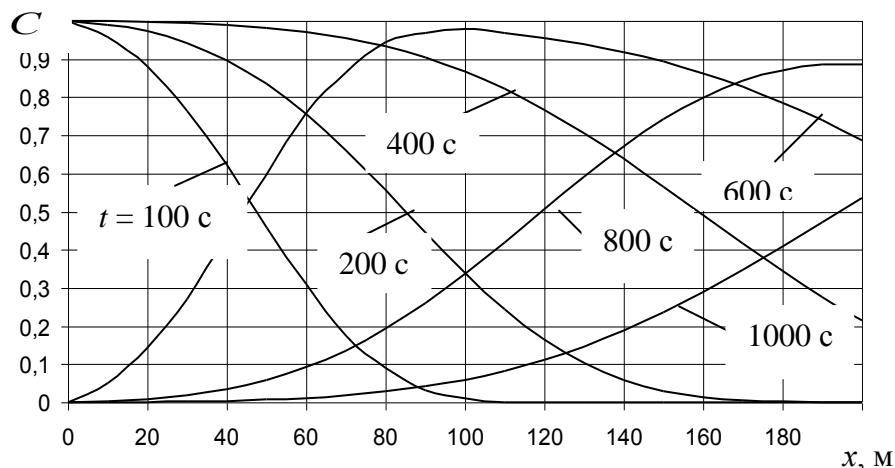


Рисунок 3 – Моделирование движения газовой волны во времени при подаче инертного газа в течение 500 с.

При расчётах приняты схемные числа Куранта  $Cu = 0,5$  и Пекле  $Pe = 1/3$ . Шаги по длине выработки  $\Delta x = 10$  м и по времени  $\Delta t = 10$  с, а скорость воздуха  $u = 0,5$  м/с.

Как видно (рис. 3), при пожаре в 100 м от места подачи инертного газа его концентрация появляется через 100 с и почти исчезает через 1000 с. При этом на стометровой отметке концентрация инертного газа будет удерживаться от 0,35 и более в течение 600 с (10 мин). Это позволит потушить пожар небольшой мощности, если достаточно указанной концентрации инертного газа. Для более точного прогноза эффективности воздействия на очаг пожара необходима разработка математической модели процессов пиролиза и горения твёрдого топлива в зависимости от температуры и количества кислорода, расходуемого на горение с учётом подачи инертного газа.

Рассмотрим пример, имеющий реальное приложение при разгазировании тупиковой выработки. Допустим, что внезапное выделение метана привело к полному загазированию выработки до недопустимых концентраций. Дальнейшее увеличение расхода воздуха с помощью ВМП невозможно из-за разрушения вентиляционного трубопровода. Тогда для

разгазирования тупиковой выработки можно применить всасывающее проветривание выработки, например, по дегазационному трубопроводу, проложенному до забоя выработки (рис. 4). При этом воздух по выработке будет поступать к забою, а от забоя по газопроводу.

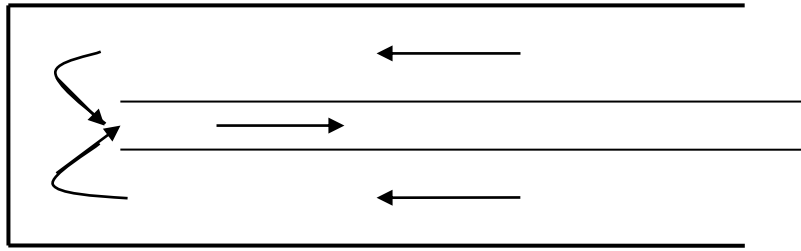


Рисунок 4 – Схема разгазирования тупиковой выработки при всасывающем режиме проветривания.

Используя расчётную схему «Медведица», которая позволяет моделировать процессы переноса газов и при положительном, и при отрицательном направлении движения потока воздуха, проследим, как происходит процесс разгазирования тупиковой выработки при  $\bar{u} = -1$ . Начальное и граничные условия здесь приняты следующими:

$$1) C(x, 0) = 1; \quad 2) C(0, t) = 1; \quad 3) C(L, t) = 0. \quad (14)$$

На рис. 5 представлены результаты расчёта разгазирования выработки при движении воздуха к тупику, а затем по дегазационному трубопроводу обратно.

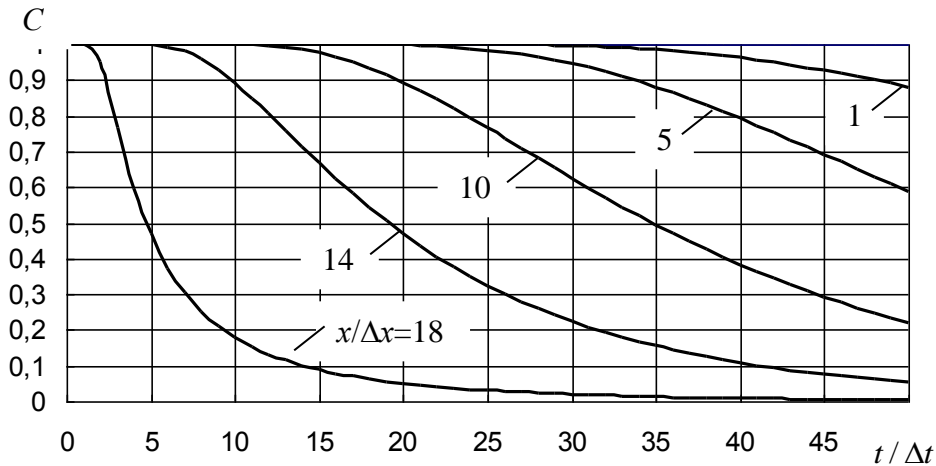


Рисунок 5 – Моделирование разгазирования тупиковой выработки.

Как видно из рис. 4 и 5, процесс переноса метана идёт в обратном порядке на забой и в дегазационный трубопровод.

На рис. 6 представлены результаты численного моделирования и аналитической кривой установившейся диффузии метана против потока воздуха.

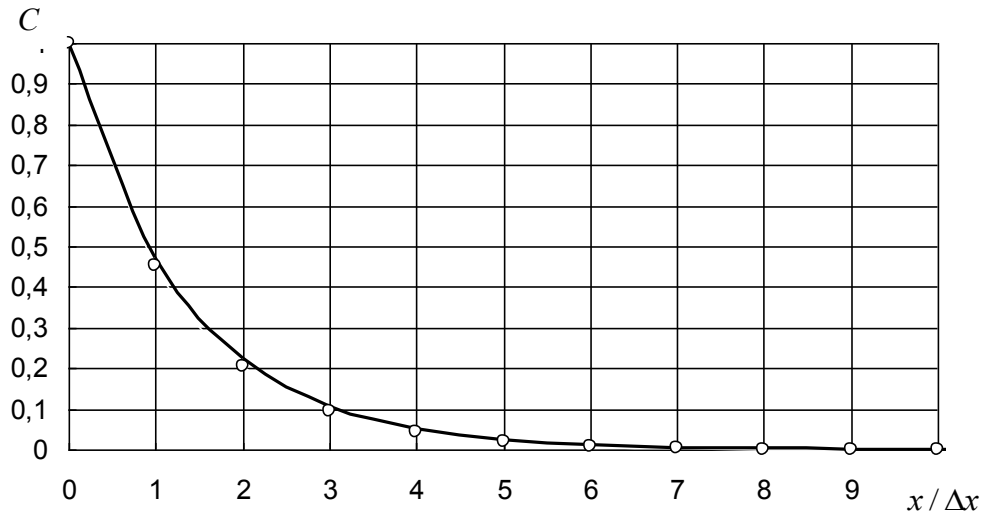


Рисунок 6 – Установившеся розподілення метана проти потоку повітря після розгазирования виробки (кружочки – результати чисельних расчётов, сплошная линия – аналітична крива).

Розподілення установившеїся дифузії газу проти потоку повітря определялось по формуле

$$C(x) = C_0 \exp\left(\frac{-ux}{D_x}\right). \quad (15)$$

При расчётах принимались те же схемные числа Пекле  $Pe = 1/3$  и Куранта  $Cu = 0,5$  при удельном весе явной схемы  $p = 0,25$ . Как видно, разработанный чисельный метод с достаточно высокой точностью описывает процессы переноса газов в горных виробках и каналах.

Таким образом, применяя расчётную схему «Медведица», можно получать чисельным методом достоверные данные о динамике переноса газов с произвольно распределёнными расходами воздуха и источниками газовой выделения вдоль протяжённых объектов.

**Выводы.** Выполнено математическое моделирование нестационарного газораспределения в горных виробках и каналах при их заполнении инертными газами и при разгазировании протяжённых объектов для создания нормальной атмосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савошик А. Н. Взаимосвязь временных характеристик газового пожаротушения / А. Н. Савошик // Средства противопожарной защиты : Сб. науч. тр. – М. : ВНИИПО, 1993. – С. 75-78.
2. Чуйков Е. В. Физико-математическая модель расчёта давления в сосуде с газовым огнетушащим веществом / Е. В. Чуйков // Средства противопожарной защиты : Сб. науч. тр. – М. : ВНИИПО, 1993. – С. 88-91.
3. Ушаков К. З. Газовая динамика шахт 2-е изд. перераб. и доп. б.м. : Издательство МГГУ, 2004. – 481 с.
4. Греков С. П. Газодинамика инертных сред и разгазирование горных виробок при авариях / С. П. Греков, А. Е. Калюсский. – М. : Недра, 1975.
5. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М. : Мир, 1980. – 616 с.