

УДК 622.868:622.411.3  
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2021.32.37.003

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ГАЗОВ В ОКРЕСТНОСТИ ОЧАГА ПОЖАРА ШАХТЫ

*Агарков А.В. аспирант*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики*

**Аннотация.** Изложены результаты математического моделирования формирования поля концентраций газов в окрестности очага пожара шахты. Предложена математическая модель нестационарного переноса какого-либо газа в горных выработках шахт при пожарах, которая позволяет исследовать все закономерности заполнения изолированных и полуизолированных объемов любого газа при постоянной или переменной скорости их образования во времени. Представлены перспективные направления дальнейших научных работ в области нестационарного распределения пожарных газов по длине и сечению горных выработок при авариях, которые включают проведение ряда теоретических и экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** шахта, подземный пожар, поле концентраций газов, математическая модель.

## MATHEMATICAL MODEL FOR THE FORMATION OF A FIELD OF GAS CONCENTRATIONS IN THE ENVIRONMENT OF A MINES FIRE

*Agarkov A.V. postgraduate*

*The «Respirator» State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters*

**Abstract.** The results of mathematical modeling of the formation of the field of gas concentrations in the vicinity of the mine fire source are presented. A mathematical model is proposed for the unsteady transfer of any gas in mine workings during fires, which allows one to study all the regularities of filling isolated and semi-isolated volumes of any gas at a constant or variable rate of their formation in time. The promising directions of further scientific work in the field of non-stationary distribution of fire gases along the length and cross-section of mine workings in case of accidents are presented, which include a number of theoretical and experimental studies.

**Key words:** mine, underground fire, gas concentration field, mathematical model.

Одним из значительных препятствий на пути к достижению высоких показателей угледобычи являются подземные пожары [1], которые сопровождаются многочисленными жертвами и приводят к потере или задержке добычи подготовленных к выемке запасов угля,

принося тем самым огромные убытки. Пожары оказывают влияние на состав шахтной среды и создают большую опасность для шахтеров и горноспасателей.

При пожарах в угольных шахтах газовая ситуация на выемочном участке может резко измениться и привести к возникновению в горных выработках недопустимых концентраций различных газов (метана, водорода, оксида и диоксида углерода и др.), особенно под кровлей выработки или же у её почвы.

Поэтому проведение теоретических исследований и разработка математической модели формирования поля концентраций газов в окрестности очага пожара угольной шахты является актуальной научно-технической задачей.

Образующиеся в зоне горения пожарные газы будут распространяться по потоку воздуха. Для исследования распространения газов используем уравнение сохранения компоненты газовой смеси за пределами очага пожара. При движении с одной составляющей скорости, аналогично уравнению (1), предложенному в работе [2], имеем

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial Z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial Z}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $Z$  – концентрация какого-либо газа, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  – время с момента начала отсчёта, с;

$u$  – проекция скорости воздуха на оси координат, м/с;

$x, y, z$  – продольная, вертикальная и поперечная координаты в выработке, м;

$D_x, D_y, D_z$  – коэффициенты турбулентной диффузии газов в направлении соответствующих координат, м<sup>2</sup>/с.

Принимая коэффициенты диффузии какого-либо газа за постоянные величины, вместо уравнения (1) будем иметь

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2}. \quad (2)$$

Представим второе и третье слагаемые в правой части уравнения (2) в конечных разностях и получим:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{D_y}{\Delta y^2} (Z_n - 2Z + Z_o) + \frac{D_z}{\Delta z^2} (Z_l - 2Z + Z_n), \quad (3)$$

где  $Z_n$  и  $Z_o$  – концентрация какого-либо газа соответственно на почве и кровле выработки, кг/м<sup>3</sup>;

$Z_l$  и  $Z_n$  – концентрация какого-либо газа соответственно на левой и правой стенках выработки кг/м<sup>3</sup>.

Примем концентрацию какого-либо газа на стенках выработки одинаковой и равной той, что была до пожара:

$$Z_n = Z_o = Z_l = Z_n = Z_0. \quad (4)$$

где  $Z_0$  – концентрация газа в окружающем массиве до тушения пожара, кг/м<sup>3</sup>.

Тогда уравнение (3) примет вид

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + 2 \left( \frac{D_y}{\Delta y^2} + \frac{D_z}{\Delta z^2} \right) (Z_0 - Z). \quad (5)$$

Обозначим слагаемые в правой части уравнения (5) через параметр

$$\gamma = 2\left(\frac{D_y}{\Delta y^2} + \frac{D_z}{\Delta z^2}\right) \quad (6)$$

где  $\gamma$  – коэффициент поглощения какого-либо газа стенками канала, 1/с.

В этом случае, в отличие от уравнения, используемого в работе для цилиндрических выработок [3], уравнение (5) принимает удобный для моделирования вид

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \gamma(Z_0 - Z) \quad (7)$$

Начальное условие для уравнения (7) представим в виде

$$Z(x, 0) = Z_0 \quad (8)$$

Таким образом, принимаем, что концентрация какого-либо газа до пожара была везде одинаковой, либо отсутствовала.

На левой и правой границах потока газов можно принять [4]

$$1) Z(0, t) = Z_1(t); 2) \frac{\partial Z(L, t)}{\partial x} = \beta[(Z_0 - Z(L, t))] \quad (9)$$

где  $Z_1(t)$  – произвольно меняющаяся во времени функция в зависимости от интенсивности выделения газа, %;

$\beta$  – коэффициент газообмена через установленную изоляционную перемычку, 1/м;

$L$  – длина выработки, м.

Первое граничное условие в (9) может быть произвольной функцией и меняться в зависимости от интенсивности образования газа. Второе граничное условие в (9) означает, что поток какого-либо газа через перемычку зависит от её герметичности. Очевидно, при коэффициенте  $\beta = 0$  на выходе из выработки – полная её изоляция, а при  $\beta \rightarrow \infty$  получим

$$Z(L, t) = Z_0 \quad (10)$$

Это будет говорить об отсутствии в этом случае перемычки. Существует несколько сложных аналитических решений уравнения (7) при постоянной интенсивности образования газа и при переменной его подаче по экспоненте [3; 5; 6].

Однако численное решение уравнения (7) с начальными и граничными условиями (8) и (9) предоставляет большие возможности для изучения закономерностей заполнения изолированной или полуизолированной выработки каким-либо газом при постоянной или переменной его подаче.

Для получения численного решения задачи представим уравнение (7) в конечных разностях [4]:

$$Z_m^{n+1} = Z_m^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [(uZ)_{m-1}^n - (uZ)_m^n] + \frac{D_x \Delta t}{\Delta x^2} (Z_{m-1}^n - 2Z_m^n + Z_{m+1}^n) - \gamma \Delta t Z_m^n \quad (11)$$

где  $\Delta t$  – шаг по времени, с;

$m$  – номер узла на оси координат  $x$  (рис. 1);

$n$  – номер временного слоя (рис. 1);

$\Delta x$  – шаг по пространственной координате, м.

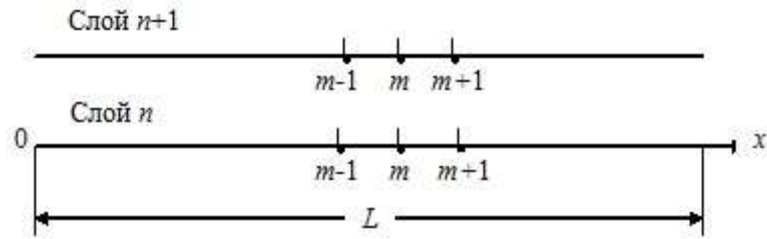


Рис. 1. Условное разбиение горной выработки на участки, длиной \$\Delta x\$, с указанием временных слоёв

Конечные разности против потока больше соответствуют физической сущности процесса. Так, конвективный поток слева поступает из точки \$(m - 1)\$ и выносится из точки \$m\$, а диффузионный поток рассеивает газ влево и вправо с убыванием его в боковые породы, на что указывает правая часть уравнения (11).

Приняв скорость газовой смеси постоянной, представим полученное уравнение (11) в критериальном виде

$$Z_m^{n+1} = Z_m^n + Cu(Z_{m-1}^n - Z_m^n) + Fo(Z_{m-1}^n - 2Z_m^n + Z_{m+1}^n) - \bar{\gamma}Z_m^n \quad (12)$$

где \$Cu = u\Delta t / \Delta x\$ – критерий моделирования Куранта;

\$Fo = D\_x \Delta t / \Delta x^2\$ – диффузионный критерий Фурье;

\$\bar{\gamma} = \gamma \Delta t\$ – безразмерный параметр интенсивности поглощения газов стенками выработки.

Преобразуем уравнение (12) к виду

$$Z_m^{n+1} = Z_m^n + (Cu + Fo)Z_{m-1}^n + (1 - Cu - 2Fo - \bar{\gamma})Z_m^n + FoZ_{m+1}^n \quad (13)$$

Очевидно, для устойчивого счёта по формуле (5) необходимо потребовать, чтобы

$$Cu + 2Fo + \bar{\gamma} < 1 \quad (14)$$

Действительно, если не соблюдать это условие, то концентрация газов может принять отрицательное значение, что не соответствует действительности. Выбрав шаги по длине выработки и по времени, и соблюдая условие устойчивости счёта (14), представим начальное условие (8) при \$n = 0\$ во всех точках от начальной \$m = 0\$ до конечной \$m = M\$ в виде

$$Z_m^0 = Z_0 \quad (15)$$

Граничные условия в начальном узле \$m = 0\$ и на выходе из выработки при \$m = M\$ представим в конечных разностях

$$1) Z_0^{n+1} = Z_1(n\Delta t); \quad 2) Z_M^{n+1} = \frac{Z_{M-1}^{n+1} + \bar{\beta}Z_0}{1 + \bar{\beta}}, \quad (16)$$

где \$\bar{\beta} = \beta \Delta x\$ – безразмерный коэффициент газообмена на выходе из выработки.

При этом вид функции \$Z\_1\$ может быть произвольным и соответствовать той интенсивности образования газа, которая будет в действительности.

Таким образом, разработанная математическая модель нестационарного переноса какого-либо газа в выработках позволяет исследовать все закономерности заполнения изолированных и полуизолированных объёмов любого газа при постоянной или переменной скорости их образования во времени.

Рассмотрим процесс заполнения каким-либо газом длинной выработки. Примем при моделировании, что образование какого-либо газа в выработке постоянно на некотором промежутке времени с граничными условиями, аналогичными (16) при \$\bar{\beta} = 1\$ и

$Z_0^{n+1} = Z_1 = const$ . Тогда, задавая начальное условие (7), примем критерии подобия равными  $Cu = 0,5$ ;  $Fo = 0,15$ ;  $\bar{\gamma} = 0$ . Принятый равным нулю безразмерный параметр интенсивности поглощения газов стенками выработки означает, что поглощение в этом случае не учитывается.

На рис. 2 представлены результаты расчёта по формуле (13) распределения безразмерной концентрации газа вдоль выработки в различное время с момента его образования. Как видно, с течением времени выработка всё больше заполняется газом и спустя 50 шагов по времени происходит её полное заполнение.

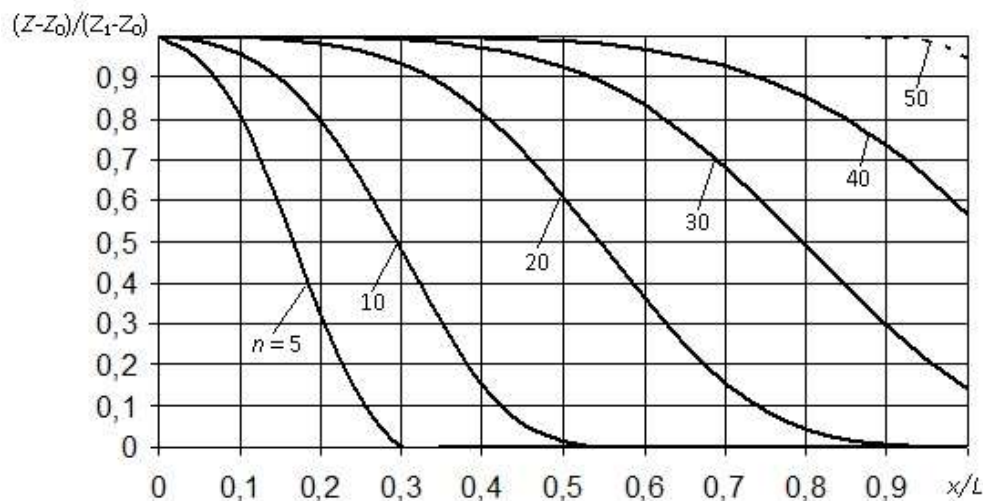


Рис. 2. Распределение безразмерной концентрации какого-либо газа вдоль выработки в различное время с момента его образования без поглощения (штриховая линия означает конец образования газа при  $n = 50$ )

Учёт поглощения газа стенками выработки резко меняет картину заполнения. На рис. 3 показано, что даже при значении параметра интенсивности поглощения газов  $\bar{\gamma} = 0,01$  удаётся заполнить отдалённую часть выработки только до 70 %. Как показывают результаты моделирования, дальнейшая интенсивность образования газа не приводит к сдвигу штриховой линии (рис. 2), и она остаётся на месте, что указывает на эффект поглощения газа стенками выработки и выход на стационарное распределение концентрации вдоль неё.

Штриховая линия (рис. 3) указывает, что распределение концентрации газа выходит на свой предел и чем дальше находится от места образования газа, тем меньше его концентрация.

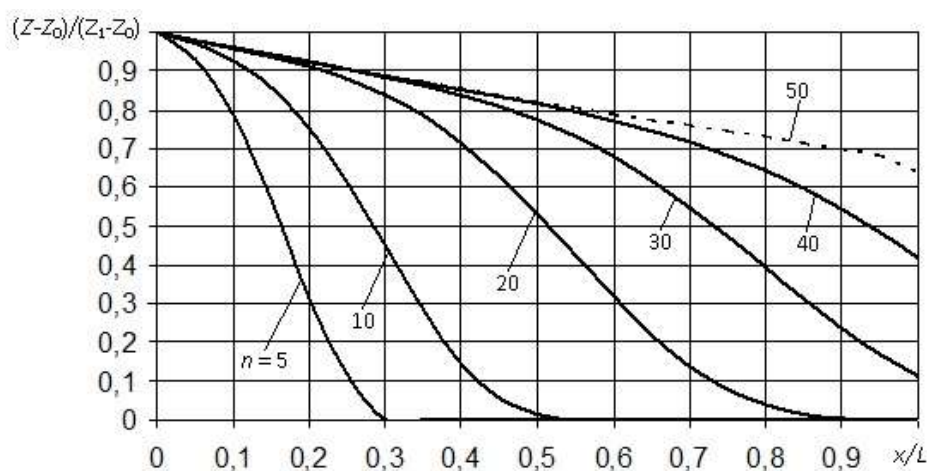


Рис. 3. Распределение безразмерной концентрации газа вдоль выработки в различное время с момента его образования с поглощением (штриховая линия означает конец образования газа)

Так, при длине выработки  $L = 40$  м и расстоянии до очага  $x = 36$  м, концентрация какого-либо газа в этом месте будет составлять 0,7 от максимального значения. Если в месте образования газа, например, диоксида углерода  $Z_1 = 50$  %, то концентрация кислорода, как пятая часть от оставшейся части смеси газов, снизится до 10 %.

Перспективными направлениями дальнейших научных работ в области нестационарного распределения пожарных газов по длине и сечению горных выработок при авариях являются исследование динамики процессов теплообмена в горных выработках шахты при авариях, исследование слоевых скоплений легких или тяжелых газов в горных выработках при пожарах, теоретические исследования возможности применения трубопроводов малого диаметра для дистанционного отбора проб пожарных газов в шахтах, а также экспериментальные исследования по дистанционному контролю газовой обстановки путем отбора и анализа проб пожарных газов в условиях штольни и подземного полигона.

### Литература

1. Agarkov A. Analysis of the emergency at the mining enterprises and evaluation of the method of remote selection of samples of mine air when conducting mine-rescue work // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2019. № 2 (3). С. 10–20.
2. Агарков А.В. Прогноз газовой обстановки вдоль горных выработок при ведении аварийно-спасательных работ в угольных шахтах // Вестник Академии гражданской защиты. 2020. № 3 (23). С. 48–56.
3. Зинченко И.Н. Численное моделирование распространения тепла или газа по горным выработкам при их внезапных выделениях // Горноспасательное дело. 1993. С. 60–65.
4. Белоцерковский О.М. Прямое численное моделирование «переходных» течений газа и задач турбулентности. М.: Б и. 1978. 72 с.
5. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 520 с.
6. Пасконов В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов. М.: Наука, 1984. 288 с.