

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕГАЗАЦИИ СКОПЛЕНИЙ ШАХТНОГО МЕТАНА БАКТЕРИЯМИ

Наведено математичну модель формування місцевих скупчень шахтного метану в зоні погашення вентиляційної виробки і прогноз наслідків їх дегазации метанокислюючими бактеріями.

## MATHEMATICAL MODEL DEGASSING OF CONGESTIONS MINE METHANE BY BACTERIAS

The mathematical model of formation of local congestions mine methane in a zone of repayment of ventilating development and forecast of consequences them degassing by methane-oxidative bacteria is given.

Разработка угольных месторождений на больших глубинах осложняется увеличением газообильности выемочных участков, повышением температуры горных пород, сложностью проветривания лав и другими факторами, снижающими производительность горнодобычной техники и безопасность труда подземных рабочих. В шахтах Донбасса проблема борьбы с метаном является одной из наиболее актуальных.

Выделение метана из пластов угленосной толщи через выработанное пространство в горные выработки составляет основную часть общего дебита газа по шахте и отдельным выемочным участкам. В то же время анализ тенденции изменения условий добычи угля и эффективности применения существующих средств дегазации участков показывает, что с углублением горных работ эффективность традиционных способов дегазации снижается, а их применение требует значительных и возрастающих материальных и финансовых затрат.

Особенно большие сложности возникают при обеспечении допустимых концентраций метана в тупиках погашаемых штреков при возвратноточных схемах проветривания участков. В таких тупиках относительно небольшие расходы утечек воздуха выносят из выработанного пространства выделяющийся в него метан, вследствие чего концентрация газа в тупике может достигать 20 % и более.

Одним из перспективных направлений развития средств дегазации выемочных участков является разработка микробиологических способов окисления метана бактериями. При этом с увеличением газообильности участков на глубоких шахтах, с повышением концентрации метана в шахтной атмосфере, повышением температуры и влажности, на участках формируется благоприятная среда для жизнедеятельности метанотрофных бактерий, повышение их метанокислительной активности и достижение большей эффективности дегазационных мероприятий.

В течение последних лет в ИГТМ НАН Украины разработан ряд способов дегазации шахт бактериями:

- нанесение бактерий на обрушенные породы через дегазационные скважины, подрабатываемые по мере подвигания забоя лавы [1]; при этом в

выработанном пространстве на пути движения метана в составе утечек воздуха формируется микробиологический фильтр значительных размеров;

- нанесение бактерий на породы, обрушающиеся при погашении вентиляционного штрека [2]; при этом на обрушенных породах формируется микробиологический фильтр, окисляющий метан;

- внесение метанооксиляющих бактерий и питательной среды в утечки воздуха, входящие в выработанное пространство лавы [3]; при этом биологический фильтр, окисляющий метан, формируется по всей длине выработанного пространства;

- нанесение метанооксиляющих бактерий на породы, обрушающиеся в выработанном пространстве, с попутным производством биомассы в скважине, пробуренной на выемочном участке [4]; при этом метан для культивирования бактерий отбирается из зоны его скопления (например, в тупике погашаемого штрека), чем обеспечивается саморегулирующаяся система: есть метан – бактерии наращиваются и используются для дегазации, нет метана на выемочном участке – бактерии не наращиваются, так как нет необходимости в выполнении дегазационных мероприятий.

Нами разработаны также технологические схемы дегазации скоплений метана в куполах обрушения пород и снижения содержания метана в вентиляционной струе введением в неё микробиологического аэрозоля.

Одним из наиболее эффективных является способ микробиологической дегазации скопления метана в тупике погашаемого штрека [5]. Как показали шахтные экспериментальные исследования, ежесуточное применение бактерий позволяет стабильно снизить концентрацию метана в тупиках штреков в 12-19 раз, надёжно обеспечить безопасность горных работ.

Для обоснования параметров технологии и прогноза эффективности микробиологической дегазации тупика погашаемого штрека, нами разработана математическая модель этого процесса, состоящая в следующем.

Пусть лавой длиной  $L_d$  отрабатывается горизонтальный угольный пласт по столбовой системе при возвратноточной схеме проветривания выемочного участка. Введём систему координат  $XOY$  с центром в середине разрезной печи и осью  $X$ , ориентированной в направлении подвигания забоя лавы. Утечки воздуха в выработанном пространстве описываются функцией вида:

$$x = L/2 + (0,1 \cdot y)^n,$$

где  $L$  – длина лавы;  $n = \ln(L/2)/\ln(0,1 \cdot y)$ .

Из газоносных пластов углистой толщи в зоне влияния горных работ происходит выделение метана в выработанное пространство со скоростью  $v_r$ , определяемой из выражения [6]:

$$v_r = [x_i \cdot m_c \cdot \gamma \cdot v_{r'} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi} / (2 \cdot L)] \cdot \{1 - (1/n) \cdot \ln[N / (N - z/m)] - k_0\} \cdot \{\Phi[A \cdot (S_2 + y)] + \Phi[A \cdot (S_2 - y)]\} \cdot \Phi[A \cdot (v_{r'} t - d - x)],$$

где  $x_j$  – газоносность пласта-спутника;  $m_c$  – мощность пласта-спутника;  $\gamma$  – объёмная масса угля в пласте-спутнике;  $v_L$  – скорость подвигания забоя лавы;  $L$  – длина полумульды сдвижения пород; согласно [7], для условий Донбасса  $L = 0,55 \cdot z + 61$ ;  $z$  – расстояние от отрабатываемого пласта до пласта-спутника;  $n$  – коэффициент;  $n = 3,5$  для подрабатываемого пласта,  $n = 2,85$  для надрабатываемого пласта;  $N$  – высота зоны газоотдачи пород;  $N = 120 \cdot m$  для подрабатываемых пород,  $N = 45 \cdot m$  для надрабатываемых пород;  $m$  – мощность вынимаемого пласта;  $k_0$  – коэффициент,  $k_0 \approx 0,0025$ ;  $\Phi$  – интегральная функция Гаусса;  $A$  – коэффициент, определяемый по формуле  $A = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi} / L$ ;  $S_2 = D_2/2 - d$ ;  $D_2$  – ширина выработанного пространства лавы;  $d$  – величина зависания пород кровли вынимаемого пласта; согласно [7], для условий Донбасса  $d = 0,43 \cdot |z| - 9$ ;  $y$  – ордината рассматриваемой точки пласта-спутника с учётом поправки, определяемой по [8];  $x$  – абсцисса той же точки;  $t$  – время движения лавы от разрезной печи.

По мере подвигания лавы ежесуточно производят погашение вентиляционного штрека шириной  $b_{Ш}$  (рис. 1).

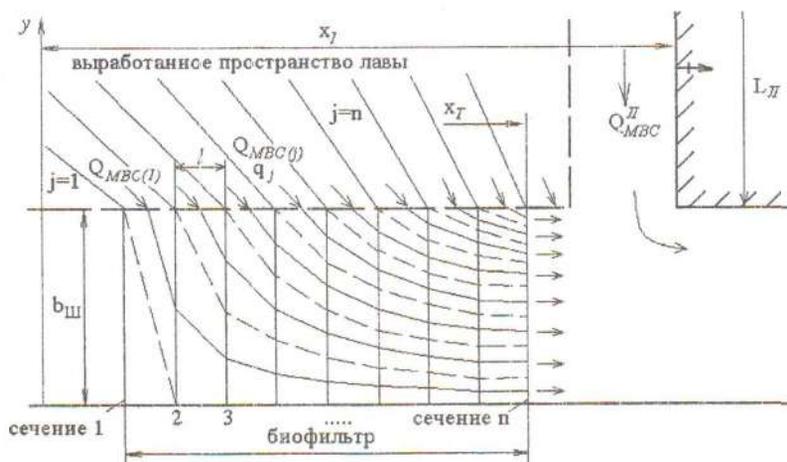


Рис. 1 – Схема к рассмотрению газовой динамики в тупике штрека при наличии биофильтра

Для дегазации тупика штрека производят ежесуточную обработку обрушенных в его сечении пород микробиологической суспензией на глубину:

$$l = v_L T,$$

где  $v_L$  – скорость подвигания забоя лавы;  $T$  – интервал времени между обработками породы микробиологической суспензией, обычно  $T = 1$  сутки.

Ежесуточный расход бактерий составляет  $P_B$ .

Выделим в утечках воздуха в выработанном пространстве  $j$ -тую трубку тока шириной  $dx$ . В движущийся по ней воздух с расходом  $Q_{MBC(j)}$  добавляется метан в количестве:

$$q_j = \sum_{y=f(x)} [v_f(x, y) \cdot dx \cdot dy].$$

Таким образом, к биофильтру подходит по трубке тока метано-воздушная смесь, содержащая  $q_j$  метана при расходе воздуха  $Q_{MBC(j)}$ , определяемом по формуле:

$$Q_{yT}(x) = 5 \cdot Q_{yT} / (v \cdot t - x),$$

где  $Q_{yT}$  – суммарный расход утечек в выработанном пространстве по оси лавы;  $v \cdot t$  – размер выработанного пространства в направлении движения забоя лавы;  $x$  – расстояние от лавы до рассматриваемой точки выработанного пространства.

Плотность биофильтра, то есть удельное содержание бактерий на единице обрабатываемой поверхности породы составляет:

$$\rho_{B/\Phi} = P_B / (l \cdot b_{\text{ш}}).$$

Метанокислительная активность бактерий (штамм ВСБ-874) определяется [9] в зависимости от концентрации метана в смеси и её температуры по формуле:

$$a_{c,t} = 960 \cdot \exp[-(t_{\text{опт}} - t^\circ)^2 / 64] \cdot \exp[-(c_{\text{опт}} - c)^2 / 160],$$

где  $t_{\text{опт}}$  – температура, оптимальная для жизнедеятельности бактерий,  $t_{\text{опт}} = 32$  °С;  $c_{\text{опт}}$  – концентрация метана, при которой активность бактерий максимальна,  $c_{\text{опт}} = 24$  %;  $t^\circ, c$  – соответственно температура среды и концентрация метана в смеси.

Таким образом, зависимость активности бактерий от параметров среды имеет вид:

$$a = f(t^\circ, c_{\text{CH}_4} = q / Q_{MBC})$$

без учёта изменения их активности во времени.

Рассмотрим движение метановоздушной смеси в зоне биофильтра в сечениях штрека (см. рис. 1).

Утечка воздуха, движущаяся по трубке тока  $j = 1$ , содержит  $Q_{MBC(1)}$  воздуха и  $q_{(1)}$  метана. До достижения сечения 1 штрека состав смеси неизменен, концентрация в ней метана

$$c_{\text{CH}_4(1)} = q_{(1)} / Q_{MBC(1)}$$

Между сечениями 1 и 2 утечка пересекает площадь биофильтра, равную:

$$S_{1(1)} = l \cdot [b_{\text{ш}}/2 + (1/2) \cdot (b_{\text{ш}}/2)] = 3 \cdot l \cdot b_{\text{ш}}/4.$$

До пересечения газовой смесью сечения 2 штрека, из её состава бактериями окислится количество метана, определяемое по формуле:

$$\Delta q_{1(l)} = S_1 \cdot \rho \cdot a_{1(l)} = \frac{3}{4} \cdot l \cdot b_{ш} [P_B(l \cdot b_{ш})] \cdot a_{1(l)} = \frac{3}{4} \cdot P_B \cdot a_{1(l)}.$$

Концентрация метана в смеси для  $j = 1$  в сечении 2:

$$c_{1(l)} = (q_1 - 1,93 \cdot q_{1(l)}) / (Q_{MBC(l)} - 1,93 \cdot q_{1(l)}).$$

Для сечения 3 штрека имеем:

$$S_2(l) = l \cdot [b_{ш}/3 + (b_{ш}/2 - b_{ш}/3)/2] = \frac{5}{12} \cdot l \cdot b_{ш};$$

$$q_{2(l)} = \frac{5}{12} \cdot P_B \cdot a_{2(l)};$$

$$\sum_1^3 q_{(l)} = \frac{9}{12} \cdot P_B \cdot a_{2(l)} + \frac{5}{12} \cdot P_B \cdot a_{2(l)};$$

$$c_{2(l)} = [q_1 - (\Delta q_{1(l)} + \Delta q_{2(l)}) \cdot 1,93] / [Q_{MBC(l)} - 1,93 \cdot (\Delta q_{1(l)} + \Delta q_{2(l)})].$$

Для сечения 4 при  $j = 1$ :

$$S_3(l) = l \cdot [b_{ш}/4 + (b_{ш}/3 - b_{ш}/4)/2] = \frac{7}{24} \cdot l \cdot b_{ш};$$

$$\Delta q_{3(l)} = \frac{7}{24} \cdot P_B \cdot a_{3(l)};$$

$$\sum_1^4 q_{(l)} = P_B \cdot \left( \frac{9}{12} \cdot P_B \cdot a_{1(l)} + \frac{5}{12} \cdot P_B \cdot a_{2(l)} + \frac{7}{24} \cdot a_{3(l)} \right);$$

$$c_{3(l)} = [q_1 - (\Delta q_{1(l)} + \Delta q_{2(l)} + \Delta q_{3(l)}) \cdot 1,93] / [Q_{MBC(l)} - 1,93 \cdot (\Delta q_{1(l)} + \Delta q_{2(l)} + \Delta q_{3(l)})].$$

Для сечения штрека  $n$  справедливо:

$$S_{(n-1)(l)} = l \cdot [b_{ш}/n + (b_{ш}/(n-1) - b_{ш}/3)/2] = \frac{l}{2} \cdot [b_{ш}/n + b_{ш}/(n-1)];$$

$$\Delta q_{(n-1)(l)} = S_{(n-1)(l)} \cdot P_B \cdot \sum_1^{n-1} a_{(n-1)(l)};$$

$$\sum_1^3 q_{(l)} = \frac{9}{12} \cdot P_B \cdot a_{2(l)} + \frac{5}{12} \cdot P_B \cdot a_{2(l)};$$

$$c_{(n-1)(l)} = [q_1 - 1,93 \cdot \sum_{i=1}^{(n-1)} \Delta q_{i(l)}] / [Q_{MBC(l)} - 1,93 \cdot \sum_{i=1}^{(n-1)} \Delta q_{i(l)}].$$

Рассуждая аналогично, для второй трубки тока ( $j = 2$ ) имеем:

- сечение 2

$$S_{1(2)} = \frac{1}{4} \cdot l \cdot b_{ш}; \Delta q_{1(2)} = \frac{1}{4} \cdot P_B \cdot a_{1(2)}; c_{1(2)} = [q_2 - 1,93 \cdot \Delta q_{1(2)}] / [Q_{MBC(2)} - 1,93 \cdot \Delta q_{1(2)}].$$

- сечение 3

$$S_{2(2)} = l \cdot [2 \cdot b_{ш}/3 - b_{ш}/2 + (b_{ш}/2 - b_{ш}/3 + b_{ш}/3)/2] = \frac{5}{12} \cdot l \cdot b_{ш};$$

$$\Delta q_{2(2)} = \frac{5}{12} \cdot P_{Б} \cdot a_{2(2)}; \quad \sum_{s=2}^3 q_{(2)} = P_{Б} \cdot \left( \frac{1}{4} \cdot a_{1(2)} + \frac{5}{12} \cdot a_{2(2)} \right);$$

$$c_{2(2)} = [q_2 - 1,93 \cdot (\Delta q_{1(2)} + \Delta q_{2(2)})] / [Q_{МВС(2)} - 1,93 \cdot (\Delta q_{1(2)} + \Delta q_{2(2)})].$$

- сечение 4

$$S_{3(2)} = l \cdot [b_{ш}/2 - b_{ш}/3 + (b_{ш}/3 - b_{ш}/4)/2 + (2 \cdot b_{ш}/3 - b_{ш}/2)/2] = \frac{7}{24} \cdot l \cdot b_{ш};$$

$$\Delta q_{3(2)} = \frac{7}{24} \cdot P_{Б} \cdot a_{3(2)}; \quad \sum_{s=2}^4 q_{(2)} = P_{Б} \cdot \left( \frac{1}{4} \cdot a_{1(2)} + \frac{5}{12} \cdot a_{2(2)} + \frac{7}{24} \cdot a_{3(2)} \right);$$

$$c_{3(2)} = [q_2 - 1,93 \cdot (\Delta q_{1(2)} + \Delta q_{2(2)} + \Delta q_{3(2)})] / [Q_{МВС(2)} - 1,93 \cdot (\Delta q_{1(2)} + \Delta q_{2(2)} + \Delta q_{3(2)})].$$

- сечение 5

$$S_{4(2)} = l \cdot [2 \cdot b_{ш}/5 - b_{ш}/4 + (b_{ш}/4 - b_{ш}/5)/2 + (b_{ш}/2 - 2 \cdot b_{ш}/5)/2] = \frac{9}{40} \cdot l \cdot b_{ш};$$

Таким образом, для  $j = 2$  и сечения штреха  $n$ :

$$S_{(n-1)(2)} = \frac{1}{4} \cdot l \cdot b_{ш} \quad (\text{при } n = 2),$$

$$S_{(n-1)(2)} = l \cdot \{ 2 \cdot b_{ш}/n - b_{ш}/(n-1) + 3 \cdot [b_{ш}/(n-1) - b_{ш}/n]/2 \} = \\ = l \cdot [b_{ш}/n + b_{ш}/(n-1)] \quad (\text{при } n > 2),$$

$$\Delta q_{(n-1)(2)} = S_{(n-1)(2)} \cdot P_{Б} \cdot a_{(n-1)(2)}; \quad \sum_{s=2}^4 q_{(2)} = P_{Б} \cdot \left( \frac{1}{4} \cdot a_{1(2)} + \frac{5}{12} \cdot a_{2(2)} + \frac{7}{24} \cdot a_{3(2)} \right);$$

$$c_{(n-1)(2)} = [q_2 - 1,93 \cdot \sum_{i=1}^{i=n-1} \Delta q_{(n-1)(2)}] / [Q_{МВС(2)} - 1,93 \cdot \sum_{i=1}^{i=n-1} \Delta q_{(n-1)(2)}].$$

Для третьей трубки тока метано-воздушной смеси ( $j = 3$ ):

- сечение 3

$$S_{2(3)} = \frac{1}{6} \cdot l \cdot b_{ш}; \quad \Delta q_{1(3)} = S_{1(3)} \cdot P_{Б} \cdot a_{1(3)};$$

$$c_{1(3)} = [q_3 - 1,93 \cdot \Delta q_{1(3)}] / [Q_{МВС(3)} - 1,93 \cdot \Delta q_{1(3)}].$$

- сечение 4:

$$S_{3(3)} = l \cdot [3 \cdot b_{ш}/4 - 2 \cdot b_{ш}/3 + b_{ш}/8 + (2 \cdot b_{ш}/3 - 2 \cdot b_{ш}/4)/2] = \frac{7}{24} \cdot l \cdot b_{ш};$$

Величины  $\Delta q_{2(3)}$  и  $c_{2(3)}$  вычисляются аналогично приведенным выше.

- сечение 5

$$S_{4(3)} = l \cdot [3 \cdot b_{ш}/5 - 2 \cdot b_{ш}/4 + 2 \cdot b_{ш}/10 - b_{ш}/8 + (2 \cdot b_{ш}/4 - 2 \cdot b_{ш}/5)/2] = \frac{9}{40} \cdot l \cdot b_{ш}.$$

Для  $j$ -той трубки тока в сечении  $n$  биофильтра имеем систему уравнений:

$$S_{(n-1)(j)} = \frac{l \cdot b_{III}}{(n-1) \cdot j}; \quad (n = j)$$

$$S_{(n-1)(j)} = \frac{l \cdot b_{III}}{2} \cdot \left( \frac{2 \cdot n - 1}{n \cdot (n-1)} \right); \quad (n > j)$$

$$\Delta q_{(n-1)(j)} = S_{(n-1)(j)} P_B \cdot a_{(n-1)(j)}; \quad c_{(n-1)(j)} = \frac{q_{(j)} - 1,93 \cdot \sum_{i=1}^{i=n-1} \Delta q_{(n-1)(j)}}{Q_{MBC(o)} - 1,93 \cdot \sum_{i=1}^{i=n-1} \Delta q_{(n-1)(j)}}$$

Координата у выхода  $j$ -той утечки воздуха к  $n$ -му сечению штрека определяется по формуле:

$$y_{n,j} = \frac{b_{III}}{2 \cdot n} (2 \cdot j - 1).$$

Приведенная система уравнений позволяет определить параметры метано-воздушной смеси в зоне биофильтра в тупике погашаемого вентиляционного штрека при известных начальных значениях расхода утечек воздуха в выработанном пространстве  $Q_{MBC}$ , его газообильности  $q$  и температуре.

Использование математической модели позволяет принимать научно обоснованные параметры технологии микробиологической дегазации тупиков погашаемых штреков. Моделирование целесообразно выполнять на ЭВМ по разработанной нами программе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ дегазации выработанного пространства: А.с. 1559208 СССР, МКИ Е 21 F 7/00 / Потураев В.Н., Мьянький В.И., Заславский Б.Л., Литвинов П.С., Демченко В.Б., Трифонова Н.В., Лосев Г.Ф. (СССР). - № 4366262/23-03; Заявл. 20.01.88; Опубл. 12.04.90, Бюл. № 15. - 3 с.
2. Способ дегазации тупика погашаемого штрека: А.с. № 1652619 СССР, МКИ Е 21 F 7/00 / В.И. Мьянький, В.Н. Калиниченко, В.Б. Демченко, А.В. Шмиголь (СССР). - № 4652544/23-03; Заявл. 20.02.89; Опубл. 30.05.91, Бюл. № 20. - 4 с.
3. Способ дегазации выработанного пространства лавы: А.с. № 1696739 СССР, МКИ Е 21 F 7/00 / В.И. Мьянький, В.Б. Демченко, В.Н. Калиниченко, А.П. Петух, А.А. Шмиголь, И.К. Курдиш, А.С. Гордиенко, Н.Ф. Кигель (СССР). - № 4722601/23-03; Заявл. 11.08.89; Опубл. 07.12.91, Бюл. № 45. - 3 с.
4. Пат. № 37720А Україна, МКВ Е 21 F 7/00. Спосіб дегазції виймальної ділянки шахти: Пат. 37720А Україна, МКВ Е 21 F 7/00 / В.І. М'янький, В.Б. Демченко, В.Г. Колесніков; НАН України, Ін-т геотехн. механіки. - № 2000041987; Заявл. 07.04.00; Опубл. 15.05.01. Бюл. № 4. - 4 с.
5. Мьянький В.И., Демченко В.Б. Микробиологическая дегазация тупиков погашаемых штреков // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов.- Ин-т геотехн. механики НАН Украины.- Днепропетровск, 2001.- Вып.25.- С.115-118.
6. Курдиш И.К., Мьянький В.И., Демченко В.Б., Кигель Н.Ф., Артёмов К.В., Трунов Л.Ф. Прогноз интенсивности микробиологического окисления метана в выработанных пространствах угольных шахт // Микробиологический журнал. - 1992. - Т. 54, № 3. - С.66-72.
7. Мьянький В.И. Сдвигение и дегазация пород и угольных пластов при очистных работах. - К.: Наукова думка, 1975. - 98 с.
8. Демченко В.Б. Прогноз газовыделения на выемочном участке шахты // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов.- Ин-т геотехн. механики НАН Украины.- Днепропетровск, 2000.- Вып.22.- С.72-75.
9. Мьянький В.И., Демченко В.Б. Лабораторные исследования метаноокислительной активности бактерий // Ин-т геотехн. механики АН УССР.- Днепропетровск, 1988. - 8 с.- Деп. в ВИНТИ 29.12.88 г., №9112-В88.