Канд. техн. наук В.Б. Демченко (ИГТМ НАН Украины) МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БИОГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕГАЗАЦИИ КУПОЛА ОБРУШЕНИЯ ПОРОД

Наведено аналітичні залежності параметрів формування складу метано-повітряної суміші і дегазації купола обвалення в штрекоподібній виробці. Параметри дегазації залежать від властивостей порід покрівлі, параметрів руху метано-повітряної суміші по виробці, а також від метанокислюючих властивостей бактерій.

MATHEMATICAL MODEL OF BIOTECHNOLOGICAL DEGASSING A DOME CAVING OF ROCKS

The analytical dependences of parameters of formation of structure methane-air mix and degassing a dome caving in alike a gallery to development are given. Parameters of degassing are depend on properties of rocks of a roof, parameters displacement of a methane-air mix on development, and as from methane-oxidative of properties of bacteria.

Существует ряд способов борьбы с местными скоплениями метана [1]. Они основаны на турбулизации движущейся по выработке смеси газов или на изменении направления ее движения.

Одним из способов борьбы с метаном в его скоплениях такого рода является микробиологический способ [2], в основу которого положено периодическое нанесение метанокисляющих бактерий на поверхность купола обрушения. Для научно обоснованного применения этого способа дегазации необходимо установить его параметры в зависимости от условий применения бактерий.

1. Характерные геометрические параметры купола обрушения пород.

Состояние газовоздушной смеси в куполе обрушения пород за крепью выработки зависит от его геометрических параметров, так как площадь купола в плане обусловливает площадь контакта газов в куполе и в штреке (интенсивность массообмена), а высота свода купола – его труднопроветриваемость.

При рассмотрении вопросов газовой динамики куполов обрушения последние обычно представляются полостями призматической формы с взаимно перпендикулярными стенками при отсутствии крепи в выработке. Такие допущения, вносящие относительную простоту в расчёты, представляются недостаточно корректными при рассмотрении вопроса использования метанокисляющих бактерий для борьбы с местными скоплениями метана, так как не позволяют определить объём смеси в полости и расход бактерий, необходимый для окисления содержащегося в ней метана.

Для определения геометрических параметров купола обрушения рассмотрим горизонтальную горную выработку, закреплённую арочной крепью и затяжкой (рис. 1). Пусть над выработкой образовался купол обрушения пород, которые заполнили незабученное пространство площадью *S*₁.

Согласно гипотезе М.М. Протодьяконова [3], контур свода обрушения описывается функцией вида:

$$y = \frac{x^2}{a_C \cdot f},\tag{1}$$

где a_C - полупролёт свода; f - коэффициент крепости пород.



Рис. 1 – Схема к определению параметров купола обрушения

Высота свода для выработок со сроком службы более 1 года равна:

$$b = \frac{2 \cdot a_C}{f}.$$
 (2)

Свод обрушения пород увеличивается во времени от замка свода вчерне (точка y_H) до конечного положения (точка y_K), соответствующего заполнению разрыхленной породой закрепного пространства, площадь которого равна:

$$S_{1} = (R_{y} - R_{c}) \cdot \frac{R_{y} + R_{c}}{2} \cdot \frac{\pi - 2 \cdot \arcsin\frac{h_{1} - h_{2}}{R_{y}}}{2 \cdot \pi}.$$
 (3)

Полость вывала площадью S₂ ограничена: сверху – параболой (1), снизу – окружностью вида:

$$y=\sqrt{R_{Y}^{2}-x^{2}},$$

поэтому при $S_1 = S_2$ имеем:

$$\frac{\int_{-a_{1}}^{a_{1}} x^{2} \cdot \frac{dx}{a_{C} \cdot f} - \int_{R_{C}}^{R_{U}} \sqrt{R_{U}^{2} - x^{2}}}{k_{P}} = (R_{U} - R_{C}) \cdot \frac{R_{U} + R_{C}}{2} \cdot \frac{\pi - 2 \cdot \arcsin\frac{h_{1} - h_{2}}{R_{U}}}{2 \cdot \pi}.$$
 (4)

После интегрирования и преобразования из уравнения (4) получим:

$$a_{1} = \frac{1}{3} \left\{ 3 \cdot a_{C} \cdot f \cdot \left[k_{P} \left(R_{V}^{2} - R_{C}^{2} \right) \cdot \frac{\pi - 2 \cdot \arcsin \frac{h_{1} - h_{2}}{R_{V}}}{4 \cdot \pi} + \frac{R_{V}^{2}}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R_{C}}{R_{V}} \right) + \frac{R_{C}}{2} \sqrt{R_{V}^{2} - R_{C}^{2}} \right] . (5)$$

2. Процесс накопления метана в куполе обрушения пород при отсутствии движения метано-воздушной смеси.

Рассмотрим горизонтальную горную выработку высотой h, в кровле которой образовался купол обрушения пород высотой h_K и шириной $a_K = 2 \cdot a_1$ (рис. 2).



Рис. 2 – Схема к определению аэрогазодинамических параметров купола обрушения пород

Пусть в начальный момент времени t_0 выработка и купол заполнены метановоздушной смесью с концентрацией метана в ней C_{CH4} при отсутствии движения смеси в направлении оси x.

Вследствие разности плотностей газов, на элементарный объём метана в смеси *V*_{CH4} действует выталкивающая сила, равная:

$$F = \rho_B \cdot V_B \cdot c_{CH4} \cdot g, \tag{6}$$

где ρ_B - плотность воздуха, кг/м³; V_B - элементарный объём метано-воздушной смеси, м³; *g* - ускорение свободного падения, м/с².

Вес рассматриваемого объёма метана в смеси равен:

$$P = \rho_{CH4} \cdot V_B \cdot c_{CH4} \cdot g,$$

где ρ_{CH4} - плотность метана, кг/м³.

Равнодействующая сил, действующих на метан в объёме V_B:

$$R = F - P = (\rho_B - \rho_{CH4}) \cdot V_B \cdot c_{CH4} \cdot g.$$
(7)

Под действием силы R метан движется в направлении оси z со скоростью v_B , определяемой по формуле:

$$v_B = \frac{k}{\eta_B} \cdot gradR, \qquad (8)$$

где *k* - коэффициент проницаемости воздуха по отношению к метану, в первом приближении $k \approx 0,001 \text{ м}^2$; η_B - коэффициент внутреннего трения (вязкость) воздуха, при 22°С $\eta_B = 0,00184 \text{ кг/м} \cdot \text{с}$.

Скорость движения метана в воздушной среде при его концентрации c_{CH4} равна:

$$v_B = \frac{k \cdot (\rho_B - \rho_{CY4}) \cdot c_{CH4} \cdot g}{\eta_B}.$$
(9)

Координаты x_{l} , y_{l} , z_{l} рассматриваемого объёма метана через время Δt станут:

$$x_{I+1} = x_I, \quad y_{I+1} = y_I, \quad z_{I+1} = z_I + \frac{k \cdot (\rho_B - \rho_{CH4}) \cdot c_{CH4} \cdot g}{\eta_B} \cdot t.$$
 (10)

При выполнении расчётов граничными условиями являются:

$$0 < z < \begin{cases} h \operatorname{при} x_{K} + a_{1} < x < x_{K} a_{1} \\ h + h_{K} - \frac{(|x_{K} - x|)^{2}}{a \cdot f} \operatorname{прu} x_{K} - a_{1} \le x \le x_{K} + a_{1} \\ 0 < c_{CH4} < 1. \end{cases}$$
(11)

На основании величины v_B определяется массоперенос Q_{CH4} во времени t по слоям смеси, заполняющей выработку и купол обрушения:

$$z_I = v_B \cdot t, \quad Q_{CH4} = Q_B \cdot c_{CH4} + M_{\mathcal{A} \mathcal{H} \Phi} / \rho_{CH4}, \tag{12}$$

где $M_{\mathcal{J} \mathcal{U} \Phi}$ - масса метана, диффундирующего в воздухе, вычисляемая по формуле [4]:

$$M_{\mathcal{A} \mathcal{U} \Phi} = D \cdot t \cdot S \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta l},$$

D - коэффициент диффузии метана в воздухе, равный 0,196 см²/с [5].

Таким образом, методом итераций при параметрах купола обрушения, вычисленных по формуле (1), определяется концентрация метана в требуемом сечении штрека и купола обрушения пород, а также объем метана в горизонтальном сечении купола обрушения.

3. Формирование газовоздушной среды в куполе обрушения пород при движении по штреку метано-воздушной смеси

При условиях, приведенных в п.2, рассмотрим процесс распределения метана при скорости ламинарного движения метано-воздушной смеси по штреку, равной v_{Γ} (см. рис. 2).

Результирующая скорость движения объёма метана V_{CH4} равна:

$$V_P = \sqrt{V_B^2 + V_\Gamma^2} \,, \tag{13}$$

где $V = \frac{Q}{S}$ - горизонтальная скорость движения смеси газов, м/с; Q – расход метановоздушной смеси в штреке, м³/с; S – площадь поперечного сечения штрека, м².

В «развёрнутом» виде (13) имеет вид:

$$V_{P} = \sqrt{\left(\frac{k(\rho_{B} - \rho_{CH4}) \cdot c_{CH4} \cdot g}{\eta_{B}}\right)^{2} + \left(\frac{Q}{S}\right)^{2}}.$$
 (14)

За время Δt движущийся в смеси метан перемещается из точки пространства с координатами x_l , y_l , z_l в точку с координатами:

$$x_{I+1} = x_I + v_{\Gamma} \cdot \Delta t; \quad y_{I+1} = y_I; \quad z_{I+1} = z_I + v_B \cdot \Delta t.$$
(15)

При переходе потока газовой смеси в турбулентный режим и значении числа Рейнольдса *Re*>10000 расслоения смеси газов в сечении штрека не происходит.

Рассмотрим процесс формирования газовой среды в куполе обрушения пород в кровле штрека. Возможны два варианта газодинамической связи сред в выработке и в куполе обрушения: 1) связь реализуется через щели в затяжках крепи выработки суммарным эквивалентным отверстием S_{KP} (m^2/m^2); 2) крепь под куполом обрушения отсутствует (чего теоретически не должно быть).

При наличии крепи толщиной h_{KP} под куполом обрушения вычисление параметров газовоздушной среды в сечении штрека выполняют по формулам (9, 15); при рассмотрении слоя, для которого $h < z < (h+h_{KP})$ в эти формулы вводят отношение раскрытия купола S_P к величине зазоров между элементами крепи S_{KP} , а расход метана определяют по формуле:

$$Q = v_B \cdot S_{KP} = \frac{k \cdot (\rho_B - \rho_{CH4}) \cdot c_{CH4} \cdot g \cdot S_{KP}}{\eta_B \cdot S_P}.$$
(16)

В пространстве за крепью $v_{I} = 0$ и процесс формирования газовой среды в куполе обрушения описывается уравнениями, приведенными в п. 2.

При отсутствии крепи под куполом обрушения пород можно говорить о действии свободной струи, распространяющейся в поперечном сечении купола. Свободной струёй примесь (метан) выносится за пределы купола обрушения, его проветриваемая зона определяется углом расширения струи $\beta_{\Gamma P}$ (см. рис. 2), который составляет:

$$\beta_{\Gamma P} = \operatorname{arctg} \left(a \cdot \varphi_{\Gamma P} \right), \tag{17}$$

где *а* – коэффициент структуры струи, зависящий от числа Рейнольдса, для рассматриваемых условий при $Re \sim 5000$ можно принять $a \approx 0.05$ [6]; $\varphi_{\Gamma P}$ – относительная ордината границы струи, $\varphi_{\Gamma P} = 2 \cdot a_1$; a_1 – полупролёт купола обрушения, вычисляемый по формуле (5).

На внешней границе свободной струи (плоскость *A*), как известно, продольная компонента скорости равна нулю.

За единицу времени Δt в купол поступит объём газовой смеси q, равный:

$$q = \frac{v_{\Gamma}}{2} \cdot 2 \cdot a_1 \cdot a_1 \cdot tg\beta_{\Gamma P} = v_{\Gamma} \cdot a_1^2 \cdot tg\beta_{\Gamma P}.$$
 (18)

Этот объём смеси будем рассматривать в качестве расслаивающегося со скоростью v_B при формировании газовоздушной среды в объёме купола обрушения, расположенного выше плоскости A.

Объём купола обрушения равен:

$$v_{K} = \pi \cdot \int_{0}^{b} \left[\frac{(x - x_{K})^{2}}{a_{1} \cdot f} \right] dx,$$
(19)

или, при $x_K = 0$,

$$v_K = \pi \cdot \int_0^b [\frac{x^2}{a_1 \cdot f}]^2 dx = \frac{\pi \cdot b^5}{5 \cdot a_1^2 \cdot f^2}.$$

Площадь поверхности купола обрушения пород равна:

$$S_{K} = 2 \cdot \pi \cdot \int_{0}^{b} \sqrt{a_{1} \cdot f \cdot y} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot y + a_{1} \cdot f}{4 \cdot y}} dy = \frac{\pi \cdot \sqrt{a_{1} \cdot f}}{6} \cdot \left[(4 \cdot b + a_{1} \cdot f)^{3/2} - (a_{1} \cdot f)^{3/2} \right].$$
(20)

4. Модель микробиологической дегазации скопления метана в куполе обрушения пород.

Дегазация купола обрушения пород бактериями может выполняться нанесением их на поверхность купола или на жёсткие «бионосители», установленные в полости купола. С математической точки зрения различие между обоими вариантами будет выражаться в отличии значения функции

$$\rho_{\rm B}=f(x),$$

где $\rho_{\rm E}$ – удельная плотность размещения бактерий в куполе вдоль оси Ox, кг/м².

Пересечём полость купола (рис. 3) двумя плоскостями, параллельными Oy, расстояние между которыми равно (x_2-x_1). Количество бактерий, окисляющих метан на интервале x_1 , x_2 равно:

$$P_{E} = \rho_{E} \left\{ \frac{\pi \sqrt{a_{1} \cdot f}}{6} \left[(4 \cdot x_{2} + a_{1} \cdot f)^{3/2} - (a_{1} \cdot f)^{3/2} \right] - \frac{\pi \sqrt{a_{1} \cdot f}}{6} \left[(4 \cdot x_{1} + a_{1} \cdot f)^{3/2} - (a_{1} \cdot f)^{3/2} \right] \right\} = (21)$$

$$= \rho_{E} \cdot \frac{\pi \sqrt{a_{1} \cdot f}}{6} \left[(4 \cdot x_{2} + a_{1} \cdot f)^{3/2} - (4 \cdot x_{1} + a_{1} \cdot f)^{3/2} \right]$$

Эффект дегазации метано-воздушной смеси на интервале x₁, x₂:

$$q_{ME(1-2)} = a(c_{CH4}, t^{\circ}) \cdot \rho_{E}(x) \cdot \frac{\pi \sqrt{a_{1} \cdot f}}{6} \left[(4 \cdot x_{2} + a_{1} \cdot f)^{3/2} - (4 \cdot x_{1} - a_{1} \cdot f)^{3/2} \right]$$

Количество метана, окисленного бактериями в объёме всего купола обрушения:



Рис. 3 – Схема к модели микробиологической дегазации купола обрушения пород

За единицу времени Δt в купол поступит объём газовой смеси, равный:

$$q = v_{\Gamma} \cdot a_1^2 \cdot tg\beta_{\Gamma P}, \qquad (22)$$

где v_{Γ} – горизонтальная скорость движения смеси по выработке; a_1 – полупролёт купола обрушения; $\beta_{\Gamma P}$ – угол расширения струи.»

Коэффициент эффективности дегазации купола определяется из выражения:

$$k_{\mathcal{A}} = \frac{q_{M \mathcal{E}(\Sigma)}}{v_{\Gamma} \cdot a_1^2 \cdot tg \beta_{\Gamma P}},\tag{23}$$

где $q_{ME(\Sigma)}$ – суммарное количество метана, окисленного популяцией бактерий на площади купола обрушения.

Таким образом, параметры дегазации купола обрушения пород метанокисляющими бактериями зависят от свойств пород кровли, определяющих геометрические параметры купола, от параметров движения метано-воздушной смеси по выработке, определяющих поступление метана в купол, а также от метанокисляющих свойств бактерий – их активности при определенных концентрации метана и температуре окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров А.И. Борьба с местными скоплениями метана в угольных шахтах.- М.: Недра, 1988.- 148 с.

2. А.с.СССР № 1652619 Способ дегазации тупика погашаемого штрека. / Мякенький В.И., Калиниченко В.Н., Демченко В.Б., Шмиголь А.В. Заявка № 4652544, 20.02.89. Опубл.30.05.91. Бюл. № 30.

3. Алексеенко С.Ф., Мележик В.П. Физика горных пород. Горное давление. - К.: Вища школа. Головное изд-во, 1987.- 279 с.

4. Гофман Ю.В. Законы, формулы, задачи физики. Справочник.- Киев, «Наукова думка», 1977.- 576 с.

5. Горная энциклопедия. Том 2 М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1986.- 575 с.

6. Воронин В.Н. Основы рудничной аэрогазодинамики. Углетехиздат, 1951.

УДК 622.647.2

Канд. техн. наук Р.В. Кирия (ИГТМ НАН Украины)

О КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НАСЫПНОГО ГРУЗА В ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ УЗЛАХ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Розглянуто питання руху потоку насипного вантажу в перевантажувальних вузлах стрічкових конвеєрів, що працюють на гірничих підприємствах. Дано фізичний зміст і аналітично визначені критичні швидкості потоку під час руху насипного вантажу по елементах перевантажувальних вузлів стрічкових конвеєрів, при яких насипний вантаж переходить з одного структурно-механічного стану в інший. Визначені умови роботи перевантажувальних вузлів стрічкових конвеєрів без завалів.

ON STALLING SPEED OF MOTION OF PILED UP LOAD IN SHIFTING KNOTS OF BELT CONVEYOR

The question of motion of stream of piled up load in the shifting knots of belt conveyers working on mountain enterprises is considered. Physical meaning and analytical definitions are given to the stalling speeds of stream at the motion of piled up load on the elements of shifting knots of belt conveyers under which piled up load passes from one structural and mechanical state to the other. The conditions of work of shifting knots of belt conveyers without obstructions are defined.

В настоящее время на горнорудных предприятиях Украины и стран СНГ изза простоты конструкций широкое применение получили пассивные перегрузочные узлы, осуществляющие движение потока груза за счет сил гравитации. Однако к их недостаткам относится низкая надежность и эффективность работы из-за частых завалов.

Анализ работ показал недостаточную изученность процесса движения насыпного груза в перегрузочных узлах ленточного конвейера. В этих работах не учитывается структурно-механическое состояние насыпного груза. Это приводит к необоснованному выбору конструктивных параметров перегрузочных узлов ленточного конвейера и их элементов.

В работах [1-3] показано, что в зависимости от скорости потока насыпной груз может находиться в трех состояниях (фазовых): твердого тела, вязко-пластичном (медленном движении) и свободно-дисперсном (быстром движении).

Если насыпной груз находится в вязко-пластичном состоянии, то внутрен-