

УДК 622.537.86

Э.П. Фельдман<sup>1</sup>, Г.В. Кирик<sup>2</sup>, А.Д. Стадник<sup>2</sup>, Н.А. Калугина<sup>1</sup>,  
А.И. Спожакин<sup>1</sup>

## НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ЗАПОЛНЕНИЯ МЕТАНОМ БУНКЕРОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

<sup>1</sup>ИФГП НАН Украины

<sup>2</sup>Концерн «Укрросметалл»

*Виведено систему рівнянь, що описують зміну концентрації метану, кисню і азоту в застійних зонах вугільних шахт. Отримано рішення цієї системи при різних потужностях вентиляції і темпах надходження вугілля в зону і видалення вугілля із зони. Проведено оцінку часу досягнення небезпечної концентрації метану у ряді аварійних ситуацій, наприклад при раптовому припиненні вентиляції.*

**Ключові слова:** метан, бункер, кінетика газовиділення, вентиляція

E.P. Feldman, G.V. Kirik, A.D. Stadnik, N.A. Kalugina, A.I. Spogakin

## TRANSIENT REGIME OF METHANE ACCUMULATION IN HOPPERS OF COAL MINES

*The system of equations is derived that describes methane, oxygen and nitrogen concentration evolution in dead zones of coal mines. Solutions of this system are obtained for various ventilation and coal removal rates. Time to achievement of methane dangerous concentration is estimated for a number of emergency situations, e.g., at sudden termination of ventilation.*

**Keywords:** methane, hopper, kinetics of gas emission, ventilation

Настоящая статья представляет собой продолжение ряда теоретических разработок, связанных с изучением накопления метана на разных объектах горного производства. В частности, нами изучено изменение концентрации метана в бункере, если его проветривание осуществляется в обычном режиме и при сокращении мощности вентиляции.

Бункер угольной шахты представляет собой емкость, которая периодически заполняется свежим углем и из которой периодически происходит отбор угля. Поэтому можно говорить о среднем количестве угля в бункере и ввести коэффициент заполнения бункера  $k_3$ , равный отношению объема, занимаемого угольным веществом, к полному объему бункера. Эта величина обычно изменяется в пределах 0,5–0,7.

Уголь, поступающий из забоя в бункер, содержит значительное количество метана. Этот метан выделяется из угля в объем бункера в продолжении нахождения в нем данной порции угля. Поступление метана из угля в бункер контролируется такими параметрами, как газонасыщенность разрабатываемого пласта, размер кусков угля, коэффициенты диффузии и фильтрации, пористость, растворимость и т.д. Скорость газовыделения подробно исследовалась рядом авторов как экспериментально, так и теоретически и может считаться хорошо изученной.

В то же время газообмен между бункером и выработкой исследован недостаточно. В одних случаях бункеры вентилируются принудительно, в других – за счет внутришахтной депрессии. В любом из этих случаев свободное пространство бункера заполнено метановоздушной смесью. Концентрация отдельных компонентов этой смеси (метана, кислорода, азота) со временем может изменяться по ряду причин.

Во-первых, метаносодержащий уголь поступает в бункер дискретными порциями, и поток метана из этого угля постепенно ослабевает. Во-вторых, проветривание бункера может происходить неравномерно, в частности в аварийной ситуации при полном отключении вентиляции оно может вообще отсутствовать. В-третьих, для предотвращения пожара может быть принято нагнетание в бункер азота.

Для построения математической модели, описывающей изменение концентрации отдельных компонентов смеси, были приняты следующие посылки.

Концентрация метана, как и других компонентов метановоздушной смеси, в общем случае неоднородна, т.е. различна в разных местах бункера. Тем не менее вследствие быстрого механического перемешивания газов и их взаимной диффузии концентрация компонентов выравнивается, согласно нашим оценкам, за доли минуты, поэтому приемлемо говорить о средних (по бункеру) концентрациях перечисленных газов.

Предварительные аэродинамические расчеты показывают, что за те же доли минуты устанавливается такой режим газообмена, при котором количество газа, поступающего в бункер, равно количеству газа, выходящего из него. Поэтому для получения количественных характеристик процесса можно использовать те же соображения, что и в [1] при выводе дифференциального уравнения, определяющего концентрацию (среднюю) метана в смеси.

Рассмотрим эти соображения более подробно на примере метана. Те же рассуждения «работают» и для кислорода и азота. Увеличение концентрации метана со временем происходит за счет поступления его в бункер из угля, а уменьшение – за счет выхода в окружающее пространство в составе смеси. Обозначим через  $m(t)$ ,  $q(t)$  и  $n(t)$  (в м<sup>3</sup>/с) количество соответственно метана, кислорода и азота, поступающих в бункер за единицу времени. Сумма этих величин  $m(t) + q(t) + n(t)$  есть общее количество газа, поступающего в бункер. Согласно вышеприведенным оценкам это же количество газа выходит из бункера за единицу времени. Будем считать, что состав воз-

духа, поступающего в бункер, одинаков и количество кислорода и азота в смеси постоянно.

Если обозначить через  $c_1(t)$  текущую концентрацию метана, скорость изменения этой величины  $dc_1/dt$  определяется разностью между скоростью поступления метана в бункер  $m(t)$  и скоростью его выхода из бункера  $(m(t) + q(t) + n(t))c_1(t)$ , т.е.

$$\frac{dc_1}{dt} = m(t) - (m(t) + q + n)c_1. \quad (1)$$

Совершенно аналогичные соображения справедливы для концентраций кислорода  $c_2(t)$  и азота  $c_3(t)$  соответственно:

$$\frac{dc_2}{dt} = q - (m(t) + q + n)c_2, \quad (2)$$

$$\frac{dc_3}{dt} = n - (m(t) + q + n)c_3. \quad (3)$$

Концентрации  $c_i$  ( $i=1,2,3$ ) связаны соотношением

$$c_1 + c_2 + c_3 = 1. \quad (4)$$

Если просуммировать уравнения (1)–(3), то получим соотношение (4).

В [2] найдено соотношение для изменения концентрации метана со временем в некотором объеме. Используя эту зависимость в условиях рассматриваемой задачи, получаем выражение для мощности источников метана, поступающего в бункер:

$$m(t) = \frac{\alpha \rho_0 k_3}{\rho_a l_c} \sqrt{\frac{\gamma_e D_f}{\pi(t + t_{tr})}}, \quad (5)$$

где  $l_c$  – радиус фракций угля, м;  $\rho_0$  – давление метана в пласте;  $\rho_a$  – атмосферное давление;  $D_f$  – коэффициент фильтрации;  $t_{tr}$  – время транспортировки угля до бункера;  $\gamma_e = \gamma_0 + v(1 - \gamma_0)(1 - \gamma + \frac{\gamma}{v})$ ,  $\gamma_0$ ,  $\gamma$  – соответственно открытая и закрытая пористость;  $v$  – коэффициент растворимости метана в угле;  $\alpha$  – геометрический фактор, учитывающий форму угольных фракций.

Количество кислорода и азота, поступающего в бункер (на единицу объема бункера), можно определить следующим образом:

$$q = \frac{Qa}{60V_b}; \quad n = \frac{Q(1-a)}{60V_b}. \quad (6)$$

Здесь  $Q$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/мин;  $V_b$  – объем бункера, м<sup>3</sup>;  $a$  – атомная концентрация кислорода в воздухе.

Начальные условия к системе уравнений (1) – (3) состоят в том, что метана в поступающем воздухе нет, а основная доля в смеси газов принадлежит кислороду и азоту:

$$c_1(t) = 0, \quad c_2(t) = a, \quad c_3(t) = 1 - a. \quad (7)$$

Численное решение системы (1) – (3) с начальными условиями (7) позволяет проследить за изменением концентрации составляющих метановоздушной смеси с учетом различных параметров угля, метана и мощности проветривания.

На рис. 1 представлено изменение концентрации метана в бункере с учетом бесперебойной загрузки угля. Каждый взлет концентрации метана – следствие загрузки новой порции угля (при расчете бункер емкостью  $100 \text{ м}^3$  загружается каждые 2 ч при проветривании  $200 \text{ м}^3/\text{мин}$ , радиус фракций угля считаем  $0,01 \text{ м}$ , время транспортировки угля до бункера 10 мин). При детальном рассмотрении одного пика мы видим, что нарастание концентрации происходит очень быстро – за считанные минуты, а спад идет уже довольно медленно. Таким образом, при использовании бункеров нельзя ограничиваться общешахтной депрессией, желательна принудительная вентиляция. Бункер по возможности должен быть заполнен менее чем на 50%, и уголь из него должен извлекаться быстро. График на рис. 2 показывает, как изменяется содержание кислорода в зависимости от колебаний концентрации метана. В данном случае эти колебания концентрации кислорода небольшие. Как видно из рис. 2, значительное увеличение концентрации метана в момент загрузки угля сопровождается относительно небольшим уменьшением концентрации кислорода, т.е. в основном происходит вытеснение азота.

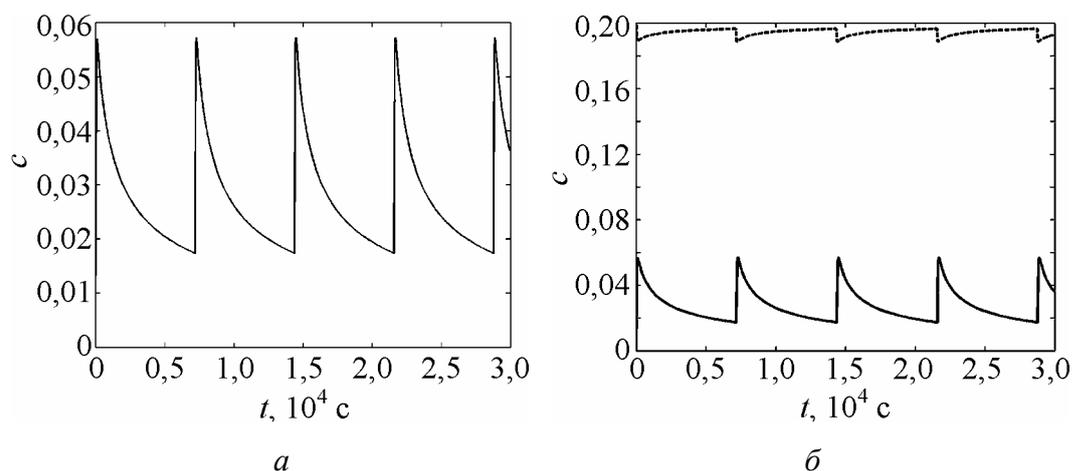
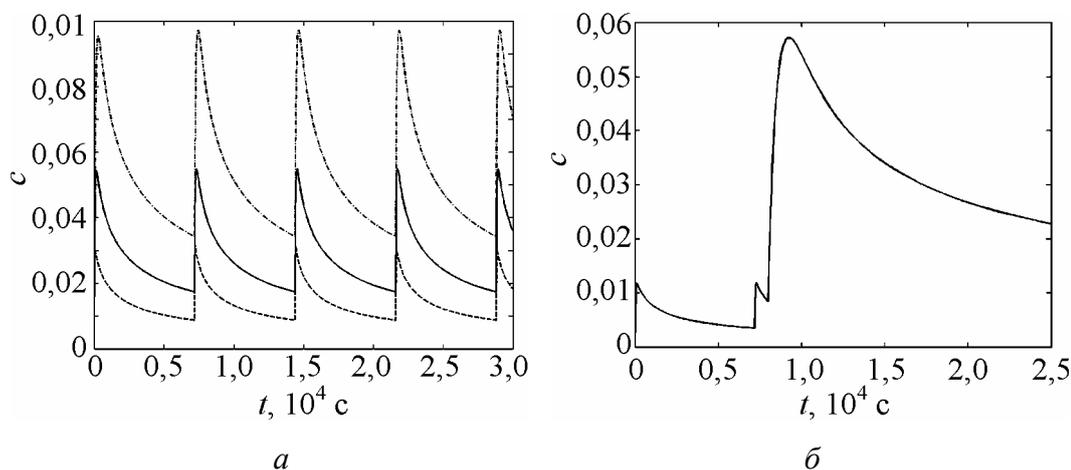


Рис. 1. Концентрация метана в бункере с учетом бесперебойной загрузки

Рис. 2. Периодические изменения концентрации метана  $c_1$  (—) и кислорода  $c_2$  (----) в бункере

Исследование изменения концентрации метана при разных режимах проветривания (рис. 3,*а*) показывает, что время достижения пика концентрации определяется не мощностью проветривания, а параметрами угля и газа. От величины проветривания будет зависеть величина максимально достигаемой в этих условиях концентрации.



**Рис. 3.** Концентрация метана в бункере при разных режимах проветривания (*а*) и в случае его прекращения (*б*). Режимы проветривания  $Q$ , м<sup>3</sup>/мин: - · - - - 50, — — — 100, ---- — 200

Рассмотрим случай прекращения проветривания бункера. Если мощность вентиляции через бункер сократилась, к примеру, в 10 раз (рис. 3,*б*) и остались только какие-то естественные утечки, то весьма быстро (за время порядка нескольких десятков минут) концентрация метана может составить более 5% и потом продолжительно (на протяжении нескольких часов) является опасной, т.е. находится на отметке выше 2%.

Заметим в заключение, что указанный режим заполнения метаном бункера в значительной мере реализуется в тупиковых выработках и других застойных зонах выработанного пространства.

1. *Фельдман Э.П., Кирик Г.В., Стадник А.Д., Спозжакин А.И., Калугина Н.А.* Заполнение метаном тупиковых выработок угольных шахт при прекращении их проветривания // ФТПРПИ. – Новосибирск (в печати).
2. *Фельдман Э.П., Василенко Т.А., Калугина Н.А.* Истечение метана из угля в замкнутый резервуар: роль явлений диффузии и фильтрации // Физика и техника высоких давлений. – 2006. – 16, № 2. – С. 99–114.

*Статья поступила в редакцию 11 марта 2009 года*