

УДК 622.537.86

**ЗАПОЛНЕНИЕ МЕТАНОМ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ
ПРИ ПРЕКРАЩЕНИИ ИХ ПРОВЕТРИВАНИЯ**

**Э. П. Фельдман, Г. В. Кирик*, А. Д. Стадник*,
А. И. Спожакин, Н. А. Калугина**

*Институт физики горных процессов Национальной Академии наук Украины,
83114, г. Донецк, Украина
Концерн “Укрросметалл”, 40030, г. Сумы, Украина

Дано теоретическое решение задачи о вытеснении метаном воздуха из тупиковых выработок угольных шахт при прекращении их проветривания. Установлены зависимости скорости поступления метана в выработку и времени достижения предельно допустимой концентрации метана в атмосфере выработки от газоносности угля, коэффициента фильтрации метана в угле, открытой и закрытой пористости, скорости подвигания забоя, скорости движения конвейерной ленты, размера отторгнутых от массива кусков угля и других геотехнологических факторов.

Метан, уголь, массоперенос, диффузия, фильтрация, концентрация метана, закрытая пористость

ВВЕДЕНИЕ

При применении наиболее прогрессивной в настоящее время столбовой системы разработки угольных пластов резко упрощается технологический процесс добычи угля за счет разделения во времени и в пространстве очистных и подготовительных работ. Однако серьезным недостатком, влияющим на повышение производительности работы добычных участков, создание безопасных условий труда горнорабочих является высокая вероятность образования местных скоплений шахтного метана на сопряжении очистного забоя с вентиляционной выработкой и в тупике ее погашения. Это стало основной причиной, приведшей к авариям, происшедшим в разные времена на разных шахтах.

Решению указанной проблемы посвящены работы отраслевых угольных, профильных институтов и институтов Национальной академии наук Украины, других научных организаций [1–3]. Рассматривая отдельные аспекты, в основном аэрологического, технологического характера указанные авторы недостаточно исследовали физику процесса метановыделения из угля в горную выработку и не приводили достаточного обоснования для решения задачи массопереноса метана из тупиковых выработок при прекращении их проветривания.

Как показывает практика расследования аварийных ситуаций, приведших к загазированию горных выработок, причина их возникновения заключается в нарушениях утвержденных схем проветривания выработок [4]. В этих случаях метан из угля, нетронутого горными работами (целиков пласта) или из разрушенного в результате выемки пласта, особенно высокогазоносного (природная газоносность более 13 м³/т с.б.м.), не смешивается с постоянно обновляющейся атмосферой в выработке и достигает концентраций, опасных для жизнедеятельности горнорабочих.

Предельно допустимая концентрация метана, обеспечивающая безопасность работы шахтеров, определяется для очистных и подготовительных выработок отраслевым нормативным документом [5] и находится в пределах от 1 % (исходящая струя воздуха из очистной или тупиковой выработки, камеры, выемочного участка) до 2 % (местные скопления метана в очистных, тупиковых и других выработках). При прекращении проветривания выработки диапазон времени достижения критических концентраций метана в атмосфере выработки весьма широк — от нескольких минут до суток — и зависит от газоносности угля, скорости подвигания выработки и ее параметров (поперечного сечения и длины), объема и размера фракций отбитого угля, физико-химических характеристик горной массы и т. д.

Особо серьезную опасность по загазированию метаном представляют тупиковые выработки ввиду существенной затрудненности газообмена между такой выработкой и выработкой, к которой она примыкает [6]. Загазирование может вызвать взрыв газугольной смеси в действующей выработке и привести к крупной аварии с человеческими жертвами.

В предлагаемой работе рассмотрен процесс заполнения метаном тупиковой выработки в аварийной ситуации при полном отключении как подачи воздуха в выработку, так и прекращения удаления метановоздушной смеси. В этих условиях метан поступает в выработку из отбитого угля, а также из нетронутого угольного массива в забое и стенках выработки, а выход метановоздушной смеси из выработки происходит через ее устье.

Физика процесса состоит в следующем. Выделяемый из угля метан смешивается с рудничной атмосферой выработки. Эта смесь, при отсутствии принудительной вентиляции, обладает избыточным (над атмосферным) давлением и поэтому, заполняя постепенно все сечение выработки, движется от груди свежееобнаженного забоя в сторону устья выработки. В районе сопряжения устья непрветриваемой тупиковой выработки с капитальными выработками метановоздушная смесь «всасывается» из тупиковой выработки свежей струей воздуха. В течение описанного процесса содержание метана в атмосфере выработки постепенно возрастает. Изменение концентрации газа в смеси происходит двумя путями — механическим перемешиванием и диффузией [7]. Предварительные оценки показывают, что при больших (~ 1 км) длинах выработки основной вклад в изменение содержания метана в метановоздушной смеси дает механическое перемешивание. Диффузия метана в воздухе играет вспомогательную роль, которая состоит в быстром (~ 1 мин) выравнивании концентрации метана по сечению выработки, если пренебречь, при огрубленном описании, возможностью скопления более легкого (по сравнению с воздухом) метана под куполом выработки.

Задача состоит в аналитическом описании, на базе простой модели газовыделения и газопереноса в тупиковой выработке, процесса вытеснения метаном воздуха из выработки. В работе даны обоснованные оценки времени заполнения выработки метаном и, что наиболее актуально, времени достижения взрывоопасной концентрации метана (отсчитываемого от момента аварийного отключения вентиляции).

I. СКОРОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА В ВЫРАБОТАННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Для решения сформулированной во введении задачи необходимо в первую очередь определить, сколько метана выходит из угля в выработку (для определенности далее будем говорить только об угле, не забывая, однако, о вмещающих породах). Речь пойдет о нахождении плотности потока метана из обнаженной поверхности угля, т.е. о количестве метана, выходящего с единицы площади угля в единицу времени.

С этой целью можно использовать найденное ранее [8] аналитическое решение задачи о выходе метана из отторгнутых от массива кусков угля произвольного размера в окружающее пространство.

Расчет производится в соответствии с моделью [8–10], согласно которой метан содержится в угле в виде газа (плотности ρ) в порах, каналах и трещинах. В мелких блоках угольного вещества метан содержится в виде твердого раствора (концентрации c). Если метан выходит в открытое пространство, то его количество (в расчете на единицу объема угля), вышедшее к моменту t из кусков угля размером L , составляет

$$\rho_0 - \bar{\rho}(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{\rho_0 F(y)}{p} e^{pt} dp \quad (1)$$

для свободного газа и

$$c_0 - \bar{c}(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{c_0 F(y)F(z)}{p} e^{pt} dp \quad (2)$$

для связанного газа.

Формулы (1) и (2) заимствованы из работы [8]. В них σ представляет собой абсциссу интегрирования в теории преобразования Лапласа, i — мнимая единица, символика “от $\sigma - i\infty$ до $\sigma + i\infty$ ” означает интегрирование в плоскости комплексной переменной вдоль вертикальной прямой, пересекающей вещественную ось в точке $\sigma > 0$, p — параметр преобразования Лапласа.

В формулы (1) и (2) по указанным ниже соотношениям входят следующие физические параметры: γ_0 — открытая пористость угля, представляющая отношение объема открытых пор (т. е. связанных системой каналов и трещин с внешней поверхностью угля) к объему угля; γ — закрытая пористость, т. е. отношение объема закрытых пор (не связанных каналами с внешней поверхностью) к объему угля; R — характерный размер мелкого угольного блока; D_f — коэффициент фильтрации метана сквозь уголь по системе открытых пор, каналов и трещин, $\text{м}^2/\text{с}$; D_e — коэффициент диффузии метана, находящегося в блоке угольного вещества в виде твердого раствора. Поскольку каждая молекула метана (в этом фазовом состоянии, подробнее см. в [7]) совершает перенос от одного положения равновесия к другому, величину D , определяющую скорость выхода метана из блоков в систему открытых пор, каналов и трещин, вполне естественно считать коэффициентом твердотельной диффузии метана; v — растворимость метана в угле. В термодинамическом равновесии концентрация газа в твердом растворе пропорциональна давлению газа, контактирующего с этим раствором (закон Генри), и v есть соответствующий коэффициент пропорциональности. Это безразмерная величина, поскольку плотности свободного газа и его концентрация в твердом растворе — величины одной размерности, $\text{кг}/\text{м}^3$. Проще говоря, v определяет долю газа, проникшего из свободного состояния в твердотельный материал угольных блоков. При комнатной температуре v меняется в пределах от 0.01 до единицы; ρ_0 — исходная плотность газообразного метана в нетронутом пласте, $c_0 = v\rho_0$ — исходная концентрация в блоках.

Перечисленные характеристики метанугольной среды входят в (1) и (2) через аргумент y функции $F(y)$, а именно $y \equiv a \sqrt{p \left[\gamma_0 + v(1-\gamma_0) \left(1 - \gamma + \frac{\gamma}{v} \right) F(z) \right]}$, где $F(z) = \frac{3}{z} \left(\text{cthz} - \frac{1}{z} \right)$, $z \equiv \sqrt{p}$;

$a \equiv \frac{L}{R} \sqrt{\frac{D_e}{D_f}}$ — основной безразмерный параметр задачи, представляющий собой корень квад-

ратный из отношения времени L^2 / D_f фильтрации метана сквозь кусок угля ко времени выхода R^2 / D_e метана из блока в систему открытых пор и каналов. Отличие эффективного коэффициента твердотельной диффузии $D_e = D / (1 - \gamma + \gamma / \nu)$ от D обусловлено наличием закрытых пор в блоках угля [9]. Время в (1) и (2) измеряется в единицах R^2 / D_e .

Формулы (1) и (2) определяют скорость выхода метана из куска угля размером L в открытое пространство. Если речь идет о крупной фракции добытого угля или о массивном пласте, то естественно в указанных формулах перейти к пределу $L \rightarrow \infty$.

Приведем далее соответствующие выкладки и результат такого перехода, поскольку этого нет в [8] и поскольку именно этот предел представляет основной интерес для решаемой задачи. В пределе при $L \rightarrow \infty$ параметр $a \rightarrow \infty$ и $y \rightarrow \infty$. Функция $F(y)$ при больших значениях аргумента ведет себя как $3 / y$.

Общее количество метана $N(t)$, выделившегося к моменту t из куска угля, равно

$$\left[\gamma_0(\rho_0 - \bar{\rho}(t)) + (1 - \gamma_0) \left(1 - \gamma + \frac{\gamma}{\nu} \right) (c_0 - \bar{c}(t)) \right] \frac{4}{3} \pi L^3$$

и в пределе при больших L составляет

$$N(t) = \frac{3\rho_0}{2\pi i a} \frac{4}{3} \pi L^3 \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{\sqrt{\gamma_0 + \nu(1-\gamma_0) \left(1 - \gamma + \frac{\gamma}{\nu} \right) F(z)}}{p^{3/2}} e^{pt} dp. \quad (3)$$

Так как параметр a пропорционален L , то $N(t)$ пропорционально L^2 , т. е. площади обнаженной поверхности. Критерий применимости (3) состоит в том, что фильтрационное время L^2 / D_f должно быть много больше диффузионного R^2 / D_e , что для кусков угля размером в несколько миллиметров и более выполняется с запасом.

Если $N(t)$ отнести к площади поверхности, получим количество метана, выделившегося к моменту t с единицы площади поверхности. Взяв производную от этой величины по (размерному) времени, получаем искомую плотность потока метана через поверхность угля:

$$j(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{N(t)}{4\pi L^2} \right) = \frac{\rho_0 \sqrt{D_e D_f}}{2\pi i R} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{\sqrt{\gamma_0 + \nu(1-\gamma_0) \left(1 - \gamma + \frac{\gamma}{\nu} \right) F(\sqrt{p})}}{\sqrt{p}} e^{pt} dp. \quad (4)$$

Время в (4) входит только через показатель экспоненты pt . Формула (4) допускает весьма простые асимптотические оценки на малых ($t \ll 1$) и больших ($t \gg 1$) временах.

Так, на малых временах основной вклад в интеграл (4) дают $p \gg 1$, когда функция $F(\sqrt{p}) \rightarrow 0$. Если положить $F(\sqrt{p}) = 0$, то интеграл (4) трансформируется к весьма простому виду:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{\sqrt{\gamma_0}}{\sqrt{p}} e^{pt} dp = \frac{1}{2\pi i} \sqrt{\frac{\gamma_0}{t}} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{e^u du}{\sqrt{u}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\gamma_0}{t}} \int_0^\infty \frac{e^{-x} dx}{\sqrt{x}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma_0}{t}}. \quad (5)$$

На больших временах основной вклад в интеграл дают $p \ll 1$, и $F(\sqrt{p})$ можно заменить на единицу. Поэтому интеграл в (4) трансформируется к тому же функциональному виду (5), но с заменой γ_0 на $\gamma_e = \gamma_0 + \nu(1 - \gamma_0) \left(1 - \gamma + \frac{\gamma}{\nu} \right)$.

В результате имеем (в размерном времени)

$$j(t) = \begin{cases} \rho_0 \sqrt{\frac{\gamma_0 D_f}{\pi}}, & \text{если } t \ll \frac{R^2}{D_e}, \\ \rho_0 \sqrt{\frac{\gamma_e D_f}{\pi}}, & \text{если } t \gg \frac{R^2}{D_e}. \end{cases} \quad (6)$$

$$j(t) = \rho_0 \sqrt{\frac{\gamma_e D_f}{\pi}}, \quad \text{если } t \gg \frac{R^2}{D_e}. \quad (7)$$

Из (6) и (7), в частности, следует, что вначале из угля выходит лишь метан, содержащийся в открытых порах, трещинах и каналах, и лишь затем, на гораздо больших временах, выходит “основной” метан, содержащийся в блоках и закрытых порах. При стандартной оценке размера блоков $R \sim 10^{-5}$ см и эффективного коэффициента диффузии $D_e \sim 10^{-12}$ см²/с формула (6) “работает” лишь на временах, меньших или порядка минуты.

Поэтому для практических целей достаточно использовать лишь (7). Далее будем применять модифицированную формулу (7) в виде

$$j(t) = \rho_0 \sqrt{\frac{\gamma_e D_f}{\pi(t+t_0)}}, \quad (8)$$

чтобы избежать нефизичного явления обращения потока в бесконечность при $t = 0$, t_0 порядка нескольких секунд. Итак, скорость выделения метана из единицы площади поверхности угля в выработанное пространство, согласно (8), зависит от метаноносности угольного пласта, коэффициента фильтрации, открытой, закрытой пористости и растворимости. Плотность потока метана, будучи вначале весьма большой, убывает по закону обратного корня из времени, отсчитываемого от момента обнажения поверхности угля.

II. МОЩНОСТЬ ИСТОЧНИКОВ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКЕ

Рассмотрим тупиковую выработку (рис. 1) в виде цилиндра длиной l и поперечным сечением S . Метан поступает в выработку из обнаженной поверхности угля (определенная доля боковой поверхности выработки), а также из отбитого угля, который транспортируется конвейером. Скорость подвигания забоя обозначим через V_n , а скорость движения конвейерной ленты через V_k .

Условимся отсчитывать время от момента прекращения действия вентиляции. Тогда, в соответствии с (8), плотность потока метана из стенок на участке, находящемся на расстоянии x от тупика, равна

$$j_s(t, x) = \rho_0 \sqrt{\frac{\gamma_e D_f}{\pi \left(t + t_0 + \frac{x}{V_n} \right)}}. \quad (9)$$

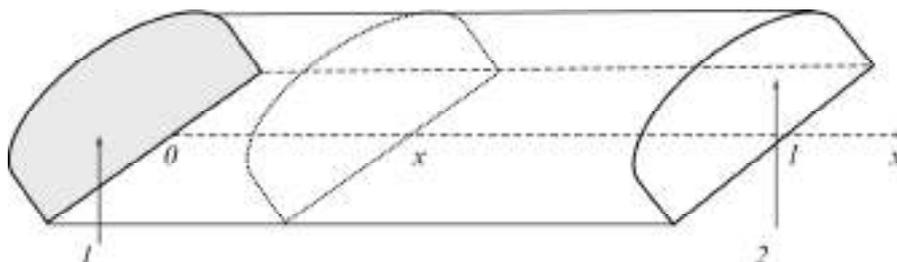


Рис. 1. Схема тупиковой выработки: 1 — забой; 2 — устье выработки

Плотность потока из отбитого угля на том же участке, равна

$$j_c(t, x) = \rho_0 \sqrt{\frac{\gamma_e D_f}{\pi \left(t + t_0 + \frac{x}{V_k} \right)}}. \quad (10)$$

Предположим, что метан, выходящий из угля в данном месте, очень быстро (за несколько секунд) смешивается с атмосферой выработки и равномерно распределяется по ее сечению.

В этом предположении, чтобы установить мощность источников метана, нужно определить площадь поверхности угля в расчете на единицу длины выработки. Элементарные геометрические выкладки, учитывающие: а) соотношение $V_n = \Pi / \rho_c S$ между скоростью продвижения забоя, производительностью Π добычного оборудования, плотностью угля ρ_c и площадью S поперечного сечения выработки; б) тот факт, что уголь выходит не по всей поверхности выработки; в) неполную загрузку добычного оборудования, приводят в итоге к следующему выражению для количества метана, поступающего за единицу времени в единичный объем выработки, т. е. мощности источников газовой выделение как функции координаты и времени:

$$n(t, x) = \rho_0 \sqrt{\frac{\gamma_e D_f}{\pi}} \left[\frac{l_f}{S} \frac{1}{\sqrt{t + t_0 + \frac{x}{V_n}}} + \frac{6k_0 V_n}{l_c V_k} \frac{1}{\sqrt{t + t_0 + \frac{x}{V_k}}} \right]. \quad (11)$$

В (11) первое слагаемое в квадратных скобках соответствует газовой выделению с поверхности выработки, а второе — из отбитого угля; l_f — длина той части контура поперечного сечения, которая соответствует выходу угля на поверхность выработки; l_c — размер кусков отбитого угля; $k_0 < 1$ — коэффициент загрузки добычного оборудования.

Формула (11) дает конкретную, простую и реальную зависимость мощности источников метана в тупиковой выработке при обычном “спокойном” газовой выделении метана из угля и газоносных пород. Помимо перечисленных в разделе II факторов, мощность источников зависит от геометрии выработки и от таких технологических факторов, как скорость продвижения забоя, скорость движения конвейера и размера отторгаемых от массива кусков угля. Так, например, из (11) видно, что мощность (интенсивность) источников линейно растет с ростом скорости продвижения и убывает по закону обратного корня с ростом скорости конвейера.

III. АЭРОДИНАМИКА МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКЕ ПРИ ОТСУТСТВИИ ВЕНТИЛЯЦИИ

Знание мощности (интенсивности) источников метановой выделение само по себе не дает ответа на вопрос о заполнении метаном выработки, т. е. о концентрации метана в выработке. Необходимо знать также, какое количество воздуха и метана выносятся из выработки за счет снижения давления газа по направлению от тупика к устью выработки. Заранее также не очевидно, является ли течение газа в выработке стационарным или нестационарным процессом ввиду того, что выделение метана из источников, согласно (11), нестационарно.

Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо хотя бы на качественном уровне исследовать движение газа в выработке. Запишем приближенные уравнения аэродинамики для метановой воздушной смеси, не делая различий между массами молекул метана и воздуха и считая, что скорость газа направлена вдоль выработки (ось x , одномерная задача). Будем также считать тече-

ние газа изотермическим (а не адиабатическим, как это обычно предполагается). Искомыми величинами в предлагаемой системе уравнений будут плотность $\rho(x, t)$ газа (метановоздушной смеси) и его скорость $v(x, t)$:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = n(t, x) \quad \text{— уравнение непрерывности;} \quad (12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{T}{m\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad \text{— уравнение Эйлера.} \quad (13)$$

Уравнение непрерывности (12) отличается от стандартного наличием мощности источников $n(t, x)$ в правой части. В уравнении Эйлера (13) фигурируют абсолютная температура T смеси и средневзвешенная масса m молекулы газа. Произведем переход к безразмерным переменным следующим образом. Скорость газа измеряем в единицах $V_s = \sqrt{T/m}$ (скорость звука), координаты определяем в единицах l — длины выработки, время — соответственно в единицах l/V_s , а плотность будем относить к плотности воздуха ρ_a при атмосферном давлении. Сохраняя те же обозначения, что и для размерных величин, приходим к следующей форме записи:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = n(t, x) = \frac{b_1}{\sqrt{t+t_0+A_1x}} + \frac{b_2}{\sqrt{t+t_0+A_2x}} \quad \text{— уравнение непрерывности;} \quad (14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad \text{— уравнение Эйлера.} \quad (15)$$

В (14) содержится четыре безразмерных параметра:

$$A_1 = \frac{V_s}{V_n}; \quad A_2 = \frac{V_s}{V_k}; \quad b_1 = \frac{\rho_0}{\rho_a} \sqrt{\frac{\gamma_e D_f l}{\pi V_s}} \cdot \frac{l_f}{S}; \quad b_2 = \frac{\rho_0}{\rho_a} \sqrt{\frac{\gamma_e D_f l}{\pi V_s}} \cdot \frac{6k_0 V_n}{l_c V_k}; \quad (16)$$

$n(x, t)$ — безразмерная плотность источников (11).

Уравнения (15) и (14) определены в области $0 < x < 1$, $0 < t < \infty$.

Граничные условия к ним:

$$\rho(t, 1) = 1; \quad v(t, 0) = 0. \quad (17)$$

Начальные:

$$\rho(0, x) = 1; \quad v(0, x) = 0. \quad (18)$$

Нахождение решения системы (14) и (15) с граничными и начальными условиями (17), (18), т. е. плотности $\rho(x, t)$ и скорости $v(x, t)$ метановоздушной смеси, наталкивается на серьезные математические трудности. Польза этих уравнений состоит в том, что они являются базой для получения усредненных уравнений аэродинамики, которые поддаются асимптотическому и оценочному исследованию.

Найдем средние по выработке значения скорости \bar{v} и плотности $\bar{\rho}$, усредняя уравнения (14) и (15) на интервале $0 < x < 1$, т. е. фактически интегрируя по x обе части этих уравнений с учетом граничных условий (17). Таким путем приходим к системе обыкновенных дифференциальных уравнений по времени:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + v_e(t) = \int_0^1 n(t, x) dx \equiv \varphi(t), \quad (19)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} v_e^2(t) = \ln \bar{\rho}(t). \quad (20)$$

Здесь черта над буквой означает среднее значение по выработке, $v_e(t)$ — скорость метано-воздушной смеси на выходе из выработки, а $\varphi(t)$ — усредненная интенсивность источников метана:

$$\varphi(t) = \frac{2b_1}{A_1}(\sqrt{t+t_0+A_1} - \sqrt{t+t_0}) + \frac{2b_2}{A_2}(\sqrt{t+t_0+A_2} - \sqrt{t+t_0}). \quad (21)$$

Проведем численные оценки величин, входящих в (21). При комнатной температуре $V_s = 300$ м/с; если скорость подвигания забоя $V_n = 10$ м/сут, а скорость движения конвейерной ленты $V_k = 1$ м/с, то $A_1 = 2.6 \cdot 10^6$, $A_2 = 3 \cdot 10^2$. Для порядковых оценок параметров b_1 и b_2 принимаем $D_f = 10^{-7}$ м²/с, $\gamma_e = 0.6$ (эти значения взяты из [8]), длина выработки $l = 10^3$ м, $S = 10$ м², $l_f = 6$ м, $k_0 = 0.5$; размер отбитых от массива кусков угля $l_c = 10^{-2}$ м; отношение ρ_0 / ρ_a пластового давления метана к атмосферному считаем равным 20. Согласно соотношениям (16), $b_1 \approx 3 \cdot 10^{-3}$; $b_2 \approx 1.8 \cdot 10^{-4}$.

Полученные численные оценки параметров b_1 , A_1 , b_2 , A_2 показывают, что в формуле (21) основную роль играет второе слагаемое, т. е. основным источником поступления метана в выработку является отбитый уголь.

В начальный момент скорость течения газа равна нулю, а плотность, согласно (18), равна единице. Поэтому на малых временах, в соответствии с (19), $\bar{\rho}(t) = 1 + \varphi(0)t$. Если подставить это значение в (20), то увидим, что среднее ускорение $\bar{w} \sim \varphi(0)t$, поэтому путь, пройденный “частицей” газа, порядка $\varphi(0)t^3$. Поскольку длина выработки равна единице (напомним, что мы оперируем с безразмерными величинами), газ проходит путь от тупика до устья выработки за время $[\varphi(0)]^{-1/3}$. Оценка величины $\varphi(0)$ дает

$$\varphi(0) \approx \frac{2b_1}{\sqrt{A_1}} + \frac{2b_2}{\sqrt{A_2}} \approx 0.4 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} = 2.4 \cdot 10^{-5}. \quad (22)$$

Таким образом, время переноса газа через выработку порядка 30, что в размерных единицах соответствует 10^2 с. Это означает, что за 1–2 мин устанавливается стационарный режим течения, при котором количество выходящего из выработки газа равно количеству поступающего газа. К тому же результату приводит и численное решение (19), (20) с учетом того, что средняя скорость, будучи сначала равной нулю, постепенно нарастает и за малые времена сравнивается с v_e . На рис. 2а показана зависимость добавочной плотности газа $\bar{\rho} - 1$ от времени. Видно, что стационарный режим происходит за ~ 1 мин.

Затем устанавливается стационарное течение, при котором $\partial \bar{\rho} / \partial t = 0$, следовательно, скорость потока $V_e(t) = \varphi(t)$ постепенно затухает от величины $\varphi(0) \sim 10^{-5}$, т. е. от $V_e \sim 3 \cdot 10^{-3}$ м/с до нуля. На этапе стационарного течения, который длится от нескольких часов и более ($t_s \sim [\varphi(0)]^{-1}$), плотность метановоздушной смеси меняется весьма незначительно:

$$\Delta \bar{\rho}(t) \equiv \bar{\rho}(t) - 1 \approx \frac{1}{2} \varphi^2(t) < 10^{-10}. \quad (23)$$

Следовательно, на этом, основном, этапе процесса дело сводится к увеличению концентрации метана в метановоздушной смеси, проще говоря, к вытеснению воздуха метаном.

IV. РОСТ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ. ВРЕМЯ ДОСТИЖЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

При стационарном процессе скорость поступления газа в выработку совпадает со скоростью выхода газа из нее. Однако поступает в выработку чистый метан, а выносится метановоздушная смесь. Поэтому изменение средней концентрации c метана в выработке подчиняется простому дифференциальному уравнению

$$\frac{dc}{dt} = \varphi(t)(1 - c). \quad (24)$$

Преимущество записи в безразмерном виде состоит в возможности получать концентрацию метана непосредственно в процентах.

Решение уравнения (24) имеет вид

$$c(t) = 1 - e^{-\int_0^t \varphi(t') dt'}. \quad (25)$$

График этой функции представлен на рис. 2б.

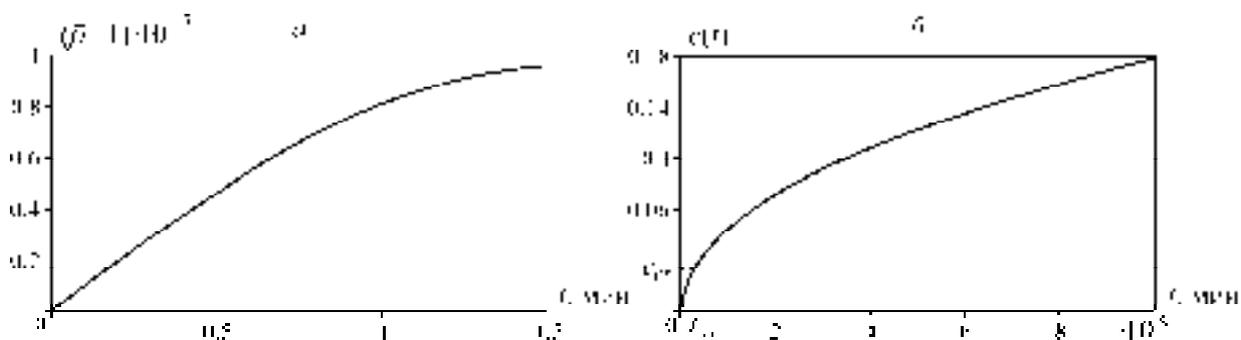


Рис. 2. Зависимость среднего давления метановоздушной смеси (а) и средней концентрации метана в атмосфере (б) в выработке от времени

Видно, что на малых временах концентрация метана растет линейно, как $\varphi(0)t$, а на больших временах, поскольку интеграл в показателе расходится, концентрация приближается к единице по экспоненциальному закону. Это означает, что на больших временах выработка заполняется исключительно метаном, т. е. он полностью вытесняет воздух из выработки. Это вытеснение, согласно очень грубой оценке, происходит за времена порядка $[\varphi(0)]^{-1} \sim 10^5$, т. е. за несколько суток. В действительности из-за истощения источников, т. е. убывания $\varphi(t)$, полное вытеснение воздуха происходит за месяцы или даже годы. Впрочем, такие сроки, по-видимому на практике не интересны. Наибольшую актуальность представляет определение времени достижения взрывоопасной концентрации.

Из рис. 2б видно, как можно определить время t_{cr} достижения взрывоопасной концентрации. Примем нормативное значение взрывоопасной концентрации $c_{cr} = 0.03$. Меняя такие параметры, как коэффициент фильтрации, скорость подвигания забоя, размер фракции добываемого угля, получаем зависимости времени достижения взрывоопасной концентрации от указанных параметров (рис. 3).

С увеличением скорости подвигания забоя время достижения предельно допустимой концентрации метана резко уменьшается: от нескольких часов до нескольких минут (рис. 3а). Поэтому увеличение скорости подвигания может быть сопряжено с серьезной опасностью. Также большую угрозу представляет отработка “рыхлого” высокопористого пласта, т. е. пласта с большим коэффициентом фильтрации, что видно из рис. 3б.

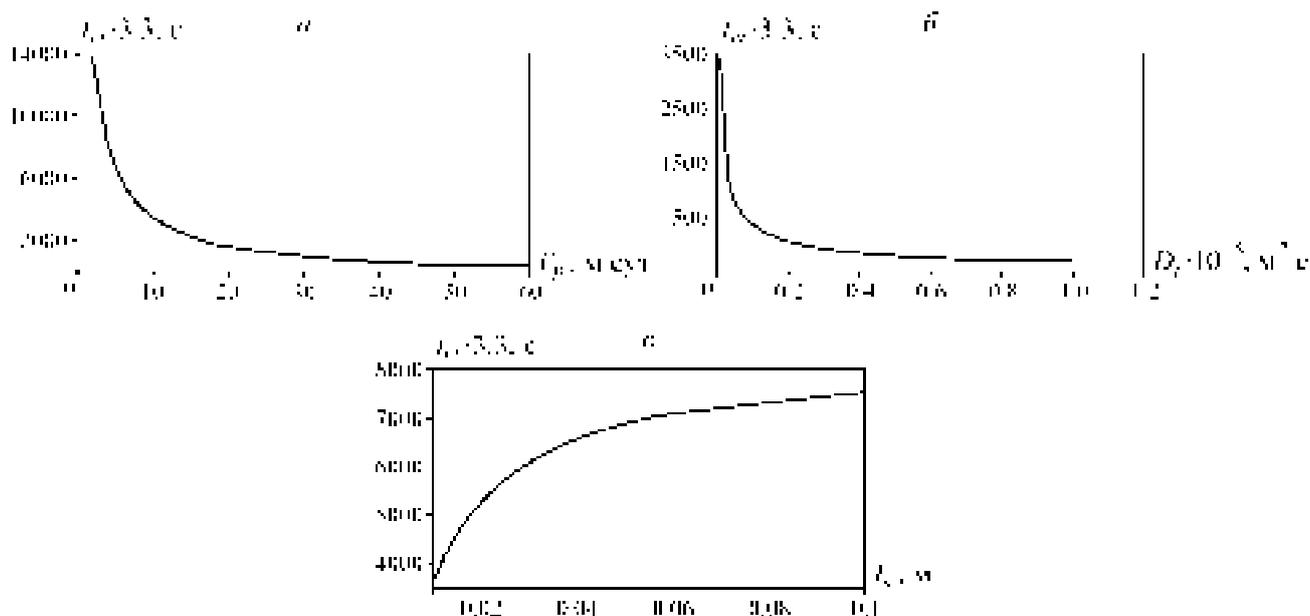


Рис. 3. Зависимость времени достижения взрывоопасной концентрации метана: *a* — от скорости подвигания забоя; *б* — от коэффициента фильтрации метана в угле; *в* — от размера фракций отбиваемого угля

Заполнение выработки метаном, выделяемым из крупных фракций угля, происходит гораздо медленнее, чем из мелких фракций (см. рис. 3в). Например, для фракции $l_c = 1$ см выработка заполняется до критической концентрации за 1 ч, а для фракции $l_c = 10$ см — за 7 ч, т. е. гораздо безопаснее вести добычу угля крупными фракциями.

ВЫВОДЫ

1. Теоретический расчет интенсивности выделения метана из угля показывает ее зависимость от природной метаноносности угольного пласта, коэффициента фильтрации метана, открытой и закрытой пористости угля, а также от растворимости метана в угольных блоках. Установлено, что интенсивность газовыделения постепенно снижается по закону обратного корня из времени, прошедшего от момента обнажения поверхности угля.

2. Получено выражение, дающее конкретные, простые и реальные зависимости скорости поступления метана в выработку от скорости подвигания забоя, скорости движения конвейерной ленты, размера отторгнутых от массива кусков угля и других геотехнических параметров.

3. Предложена аэродинамическая модель течения метановоздушной смеси в тупиковой выработке, согласно которой градиент давления смеси вдоль выработки создается за счет поступления в нее метана из стенок и из отбитого угля.

4. Сформулировано простое дифференциальное уравнение, описывающее вытеснение метаном воздуха из тупиковой выработки, на базе решения которого установлены зависимости времени достижения взрывоопасной концентрации метана в атмосфере выработки от коэффициента фильтрации, скорости подвигания забоя и от размеров фракций угля, отторгнутого от массива.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. НАН Украины А. Д. Алексееву за внимание к работе, полезные советы и плодотворные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов А. В., Бобров А. И., Захаров Е. П., Попов И. Н. Условия образования местных скоплений метана на сопряжении лав с вентиляционными выработками // Уголь Украины. — 2004. — № 7.
2. Грядущий В. Б., Самойленко Е. Я. Предотвращение взрывов и вспышек метана в тупиках погашения вентиляционных выработок // Уголь Украины. — 2006. — № 3.
3. Бельдеников В. Я., Оспанов Т. Ж., Бялик С. Н. Ликвидация местных скоплений метана на сопряжении лав с вентиляционным штреком // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. — 1980. — № 9.
4. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. — Киев: Основа, 1994.
5. Правила безопасности в угольных шахтах. НПАОП 10.0.-1.01-05 (государственный нормативный акт об охране труда).
6. Ушаков К. З., Бурчаков А. С., Пучков Л. А., Медведев И. И. Аэрология горных предприятий: учебник для вузов. — М.: Недра, 1987.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986.
8. 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. — Т. 16. — № 2.
9. Ковалев Ю. М., Кузнецов С. В. Фильтрация газа в разрабатываемом угольном пласте при диффузионном процессе десорбции // ФТПРПИ. — 1974. — № 6.
10. Алексеев А. Д., Фельдман Э. П., Василенко Т. А., Гуменник К. В., Калугина Н. А. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта // Журнал технической физики. — 2007. — Т. 77. — Вып. 4.

Поступила в редакцию 22/II 2010