

PACS: 91.60.Np, 91.60.Tn

Г.П. Стариков¹, В.М. Юрченко², Т.Н. Мельник², А.А. Подрухин¹

КИНЕТИКА ФИЛЬТРАЦИИ И ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА НА ПОВЕРХНОСТЬ ПРИ ПРЕКРАЩЕНИИ ВЕДЕНИЯ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

¹Институт физики горных процессов, Донецк

²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2019 года

Проведен теоретический анализ кинетики фильтрации метана из выработанного пространства угольных шахт по направлению к поверхности и накопления метана внутри сооружений, расположенных над закрытыми выработками, где не проводятся вентиляция и водоотлив. Оценено время достижения взрывоопасной концентрации метана внутри помещений и определена длительность периода ожидания с момента закрытия выработки, пока отсутствует проникновение газа в помещение. По данным о скорости накопления газа в помещении можно делать выводы о степени нарушенности и газопроницаемости нижележащих пород. Расчеты дают возможность прогнозировать результат закрытия отдельных выработок и нерентабельных шахт в целом.

Ключевые слова: метан, углепородный массив, кинетика, фильтрация, взрывоопасность

Введение

При закрытии угольных шахт, обрабатывающих высокогазоносные угольные пласты, неизбежно происходит выделение метана на земную поверхность. Это обусловлено прекращением работы вентиляционного и насосного оборудования, определяющего заполнение выработанного пространства метаном.

При наличии на поверхности над этим пространством зданий и сооружений возникает вероятность вытеснения из них воздуха метаном, обладающим более низкой плотностью и вязкостью. Опасность этого явления заключается в способности метана замещать кислород, создавая атмосферу, опасную для жизни человека, а также формировать взрывоопасные концентрации.

Проблема прогнозирования выхода метана на поверхность и накопления его в зданиях и сооружениях приобрела особую актуальность в последние годы, когда закрытие нерентабельных шахт и консервация выработок разными методами стали массовым явлением. В таких условиях выход метана на поверхность представляет особую опасность. При отсутствии контроля и меро-

приятый по предотвращению чрезвычайных ситуаций, помимо экологических последствий, серьезную угрозу представляет накопление метана в подземных и надземных частях зданий и сооружений до взрывоопасного уровня.

Необходимо отметить, что недостаточное внимание этой проблеме уделяется еще и потому, что выход метана на поверхность не является быстрым процессом и возможные последствия непродуманного подхода к отмене проветривания и водоотлива могут сказываться по прошествии длительного времени. Опасность для людей вследствие данного факта не уменьшается, но притупляется осознание необходимости прогнозирования, контроля и проведения комплекса мероприятий по обеспечению безопасности.

К наиболее известным случаям выделения метана в здания и сооружения с последующим воспламенением и взрывом относятся:

- взрыв метана в складском помещении в 1996 г. на территории горного отвода шахты № 5-6, закрытой в 1966 г. в Калининском районе г. Донецка;
- взрыв метана в 2000 г. в Червоногвардейском районе г. Макеевки в гараже, расположенном на территории горного отвода шахты им. С. Орджоникидзе, закрытой в 1997 г.;
- возгорание метана в 2002 г. в г. Горловке в коммуникационном колодце на территории поселка Майский, расположенном на территории горного отвода шахты «Кочегарка», закрытой в 1997 г.

Эти и другие многочисленные факты [1,2] являются свидетельствами необходимости тщательного анализа кинетики переноса метана, содержащегося в угольных пластах и вмещающих породах, на поверхность с целью усовершенствования оценок и методов прогнозирования его накопления до взрывоопасного уровня.

Основные соотношения

Кинетика протекания метана к поверхности и накопления в замкнутых объемах определяется проницаемостью горных пород, зависящей от степени их нарушенности и уровня напряженно-деформированного состояния горного массива. Данный вопрос неоднократно анализировали многие авторы [3–5], но ряд аспектов требует дополнительного теоретического рассмотрения. При описании кинетики выхода метана на поверхность часто использовали оценочный подход, не включавший в себя изучение особенностей массопереноса газа на большие расстояния в толще угольного вещества и вмещающих пород.

Массоперенос метана в горных породах в направлении к поверхности, в отличие от перераспределения его в горных выработках в процессе проходки и угледобычи, происходит благодаря фильтрации газа по системе микроскопических открытых пор и каналов, пронизывающих уголь и вмещающие породы. Суммарный объем этой системы, по разным оценкам, составляет около 10%, поэтому перенос газа по открытым порам обеспечивает его перемещение на более дальние расстояния и с большей скоростью, чем диффузия в толще твердого тела.

Необходимо отметить, что анализ кинетики газовыделения в процессе угледобычи предусматривает, что метан высвобождается, во-первых, из фрагментированных кусков угля, отколотых от угольного массива, а во-вторых, из обнажившихся участков пласта. В обоих случаях интенсивное газовыделение происходит вследствие массопереноса метана с глубины угольного вещества порядка нескольких сантиметров (для отколотых фрагментов) или нескольких метров (для оставшегося пласта). Метан начинает высвобождаться сразу, достаточно быстро и в большом объеме, при этом безопасность проведения работ (исчезающе низкая концентрация метана в выработках менее 1.5%) обеспечивается интенсивной вентиляцией и системой газовой сигнализации.

При перемещении метана к поверхности расстояние, которое преодолевают молекулы газа, составляет порядка нескольких сотен метров, а порой километр и более. Если глубина выработок на закрытых в данный момент шахтах, заложенных около 70 лет назад, составляла 300–400 м, то в последние годы на более современных и работающих шахтах добыча ведется на горизонтах 700–1300 м. Эти шахты также исчерпываются, признаются нерентабельными и консервируются, водоотлив и вентиляция выработок, естественно, прекращаются. Газовыделение же продолжается, метан неконтролируемо накапливается в выработанном пространстве в гораздо большей концентрации, нежели в момент проведения добычных работ при наличии интенсивной вентиляции, и начинает перемещаться к поверхности. Тем самым дается старт возможному возникновению техногенной и экологической угрозы.

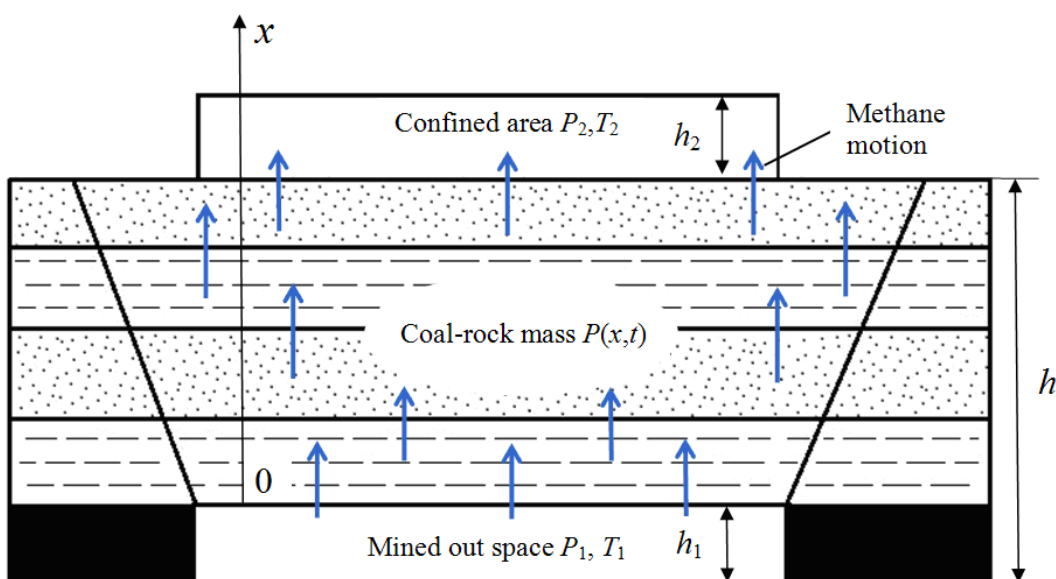


Рис. 1. Схема процессов перемещения метана из выработанного пространства к поверхности и его накопления в замкнутом объеме

Схематическое изображение процесса перемещения метана из выработанного пространства к поверхности представлено на рис. 1. Газ поднимается вверх по системе каналов, пронизывающих угольные пласты и вмещающие породы. Ось $0x$ направлена вертикально вверх, начало отсчета совпадает с верхней границей выработанного пространства. Высота выработанного пространства обозначена как h_1 , давление и температура метана – соответственно $P_1(t)$, T_1 . В вышележащих породах общей толщиной h давление метана обозначено $P(x,t)$. На поверхности (в некотором помещении высотой h_2) метан накапливается (давление $P_2(t)$, температура T_2). Разность температур в выработке T_1 (40–50°C) и на поверхности T_2 (~ 20°C) составляет порядка 20–30°C.

Теоретически массоперенос метана из выработанного пространства на поверхность можно описать как фильтрацию, используя при этом известное уравнение Дарси [6]:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = D_f(x) \frac{\partial^2 \rho(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $\rho(x,t)$ – плотность метана (число частиц в единице объема) в фильтрационном объеме (каналах и открытых порах), $D_f(x)$ – коэффициент фильтрации. Чтобы упростить процесс решения, можно заменить коэффициент фильтрации, зависящий от координаты, его усредненным значением [7]:

$$D_f = \frac{1}{h} \int_0^h D_f(x) dx. \quad (2)$$

Поток молекул метана через границы $x = 0$ и $x = h$ записывается как

$$j = -D_f \frac{\partial \rho(x)}{\partial x}. \quad (3)$$

С учетом уравнения состояния идеального газа выражение (3) позволяет записать граничные условия, дополняющие уравнение фильтрации. Приращение числа молекул метана N в замкнутом объеме на поверхности (и соответственно убывание в выработанном пространстве) в расчете на единицу поверхности равно потоку через соответствующую границу

$$\frac{dN}{dt} = j. \quad (4)$$

Следовательно,

$$\frac{h_1}{RT_1} \frac{dP_1}{dt} = -D_f \left. \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad \frac{h_2}{RT_2} \frac{dP_2}{dt} = -D_f \left. \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} \right|_{x=h}. \quad (5)$$

Для удобства вычислений имеет смысл перейти к безразмерным переменным и измерять расстояние в единицах h , время – в единицах h^2 / D_f , а плотность метана в фильтрационном объеме – в единицах ρ_0 (начальной концентрации метана в открытых порах и каналах, связанной с давлением соотношением $P = \rho_0 RT$). Тогда система уравнений (1), (5) примет вид

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \rho(x,t)}{\partial x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{h_1}{h R \rho_0 T_1} \frac{dP_1(t)}{dt} = - \left. \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (7)$$

$$\frac{h_2}{h R \rho_0 T_2} \frac{dP_2(t)}{dt} = - \left. \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} \right|_{x=1}. \quad (8)$$

Начальные условия к уравнениям (6)–(8) записываются как

$$\rho(x,0) = 1, \quad P_1(0) = P_1, \quad P_2(0) = 0. \quad (9)$$

В данной формулировке начальные условия предполагают, что в выработанном пространстве скопился некий избыток метана под давлением P_1 , который и начинает перемещаться к поверхности. Кроме того,

$$P_1(t) = RT_1 \rho_0 \rho(0,t), \quad P_2(t) = RT_2 \rho_0 \rho(1,t). \quad (10)$$

Решение задачи, сформулированной таким образом, позволяет получить подробные данные о кинетике переноса метана в процессе фильтрации и его накоплении в замкнутых помещениях на поверхности.

Результаты и обсуждение

Основной величиной, важной с практической точки зрения, является давление метана в объеме на поверхности $P_2(t)$. Решение представленной задачи, полученное при помощи преобразования Лапласа, имеет вид

$$P_2(t) = P_e + 8\rho_0 RT_2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \frac{P_1}{RT_1}}{n^2 \pi^2 - 1} \exp(-n\pi t), \quad (11)$$

где

$$P_e = P_1 \frac{h_1}{T_1} \left(\frac{h_1}{T_1} + \frac{h\gamma}{\tilde{T}} + \frac{h_2}{T_2} \right)^{-1} \quad (12)$$

– равновесная величина, достигаемая по окончании процесса и определяемая из условия материального баланса; $\tilde{T} = \frac{1}{h} \int_0^h T(x) dx$ – средняя температура

ратура в толще породы; γ – объем фильтрационных каналов (открытая пористость горного массива), $\gamma \sim 0.1$. В упрощенном случае

$$P_e = P_1 \frac{T_2}{T_1} \frac{h_1}{\gamma h + h_2}. \quad (13)$$

При естественных для углепородного массива условиях ($T_1 = 313$ К, $T_2 = 293$ К, $h = 700$ м, $h_1 = 2$ м, $h_2 = 2$ м) результирующее давление P_e составляет около 3% от P_0 . Соответственно при $P_1 = 3 \cdot 10^5$ Па [3] парциальное давление метана $P_e \sim 10^4$ Па, т.е. достигает 10% от атмосферного давления. Такая концентрация метана в воздухе является взрывоопасной.

Более распространенной является ситуация, когда выработанное пространство после окончания разработки постепенно затопливается водой. В этом случае граничное условие (10) приобретает вид $P_1(t) = \text{const} = P_1$. В известной мере такая постановка задачи упрощает решение уравнения в частных производных (6) (см. [7]), позволяя записать результат как

$$P_2(t) = P_1 \frac{T_2}{T_1} \frac{h_1}{\gamma h + h_2} \left(1 - \text{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{t}} \right) \right). \quad (14)$$

Возвращаясь к размерным величинам времени и учитывая, что

$$D_f = \frac{\kappa}{\mu} P_1 \quad (15)$$

(где κ – коэффициент проницаемости породы, m^2 ; μ – динамическая вязкость метана, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ [6]), получаем

$$P_2(t) = P_1 \frac{T_2}{T_1} \frac{h_1}{\gamma h + h_2} \left(1 - \text{erf} \left(\frac{h}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\kappa P_1 t}} \right) \right). \quad (16)$$

Результат расчета для указанных естественных условий при начальной плотности метана в фильтрационном объеме $\rho_0 = 0.095$ представлен на рис. 2.

Из рис. 2 хорошо видно, что периоду заполнения метаном помещения на поверхности предшествует довольно длительный период ожидания, необходимый для перемещения газа в толще пород. Длительность этого периода варьируется от нескольких недель до нескольких лет в зависимости от проницаемости и степени нарушенности породы.

Накопление метана на начальном этапе можно описать асимптотической формулой

$$\Delta P_2(t) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{P_e}{h} \sqrt{D_f t}. \quad (17)$$

Отсюда можно получить оценку времени достижения взрывоопасной концентрации метана, поскольку эта концентрация является весьма малой величиной. Диапазон взрывоопасной концентрации составляет 4.4–16% [8].

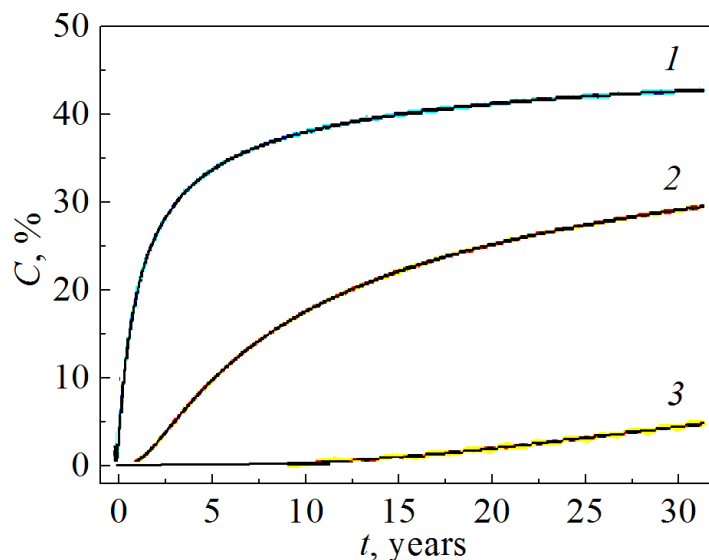


Рис. 2. Зависимость концентрации метана в замкнутом объеме на поверхности от времени при затоплении выработанного пространства для различной проницаемости породы κ , m^2 : 1 – 10^{-18} (ненарушенные породы), 2 – 10^{-17} (трещиноватые), 3 – 10^{-16} (разрушенные)

При дальнейшем увеличении концентрации метановоздушная смесь воспламеняется, но не взрывается. Оценка дает время достижения взрывоопасного уровня содержания метана в воздухе

$$t_* = \frac{\pi h^2 \mu}{4 \kappa P_1} \left(\frac{P_{atm} C_*}{P_e} \right)^2. \quad (18)$$

Расчет величины t_* иллюстрирует рис. 3. Здесь отображен начальный период накопления газа (см. рис. 2). Расчет показывает, что при величине $\kappa = 10^{-18} \text{ m}^2$, характерной для ненарушенных пород, время $t_* \sim 10^9 \text{ s} \sim 30$ лет. С увеличением проницаемости (сообразно степени нарушенности) период накопления уменьшается: при $\kappa = 10^{-17} \text{ m}^2$ $t \sim 10^8 \text{ s} \sim 3$ лет, а при $\kappa = 10^{-16} \text{ m}^2$ $t \sim 10^7 \text{ s} \sim 4$ месяцев.

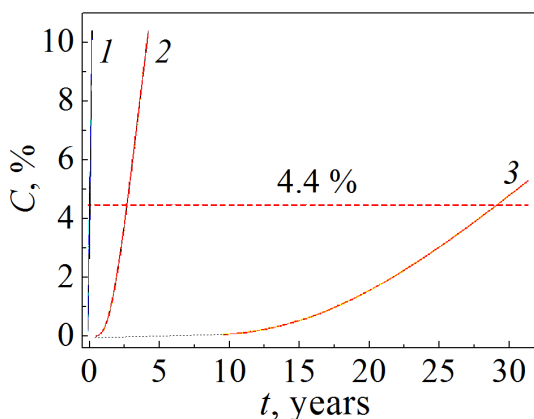


Рис. 3. Время достижения опасной концентрации метана ($C = 4.4\%$) для различной газопроницаемости κ , m^2 : 1 – 10^{-16} , 2 – 10^{-17} , 3 – 10^{-18}

Результаты расчета подтверждаются имеющимися данными о случаях взрыва или воспламенения метана в помещениях, расположенных над закрытыми некоторое время назад и затопленными выработками [1,2].

Выводы

Проведенный теоретический анализ процесса фильтрации метана из выработанного пространства угольных шахт по направлению к поверхности и кинетики накопления метана внутри сооружений, расположенных над закрытыми выработками, где не проводятся вентиляция и водоотлив, позволил оценить время достижения взрывоопасной концентрации метана внутри помещений и определить длительность периода ожидания с момента закрытия выработки, пока отсутствует проникновение газа в помещение. При наличии данных о скорости накопления газа в помещении можно делать выводы о степени нарушенности и газопроницаемости нижележащих пород. С другой стороны, расчеты позволяют прогнозировать результат закрытия отдельных выработок и нерентабельных шахт в целом, поскольку газоносность разрабатываемых пластов и вероятность (а также скорость) их затопления при остановке работы оборудования известна.

1. Ю.Н. Гавриленко, В.Н. Ермаков, Ю.Ф. Кренида, О.А. Улицкий, В.А. Дрибан, Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины, Норд-Пресс, Донецк (2004).
2. Г.П. Стариков, А.А. Подрухин, Э.В. Борисенко, Труды РАНМИ: сб. научн. трудов, Донецк (2018), № 5 (20), с. 128–144.
3. Е.В. Мазаник, Д.В. Борисенко, П.В. Ларионов, Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 8. Экология, метанобезопасность, Горная книга, Москва (2011), с. 407–419.
4. Н.М. Качурин, Д.Н. Шкуратский, Л.Л. Рыбак, Р.В. Сидоров, Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле вып. 2, 42 (2015).
5. А.Ф. Булат, И.Н. Слащев, Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць, ІГТМ НАНУ, Дніпропетровськ (2017), вип. 132, с. 3–16.
6. А.Д. Алексеев, Физика угля и горных процессов, Наукова думка, Киев (2010).
7. И.Г. Араманович, В.И. Левин, Уравнения математической физики, Наука, Москва (1969).
8. К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, И.И. Медведев, Рудничная аэрология, Недра, Москва (1978).

G.P. Starikov, V.M. Yurchenko, T.N. Melnik, A.A. Podrukhin

KINETICS OF METHANE FILTRATION AND RELEASE ON THE LAND SURFACE AFTER EXCAVATION SHUTDOWN IN COAL MINES

Theoretical analysis of the kinetics of surface-directed methane filtration from the mined-out space of coal mines has been carried out with respect to methane accumulation within buildings located above workings closed without ventilation and pumping. The time of

accumulation of an explosive concentration of methane inside the buildings is estimated and the duration of a latent period since the working has been closed when no gas penetrates the building. The data about the rate of gas accumulation within a building allow conclusions about the condition of ground and gas permeability of underlying rocks. The calculation provides a forecast of the results of shutdown of single workings and an unprofitable mine as a whole.

Keywords: methane, coal-rock massif, kinetics, filtration, explosion hazard

Fig. 1. Scheme of methane motion from a mined-out space to the ground and accumulation within a closed volume

Fig. 2. Time dependence of methane concentration in a confined area on the ground surface under flooding of the mined-out space with water at varied rock penetrability κ , m^2 : $1 - 10^{-18}$ (undisturbed rock), $2 - 10^{-17}$ (fractured rock), $3 - 10^{-16}$ (decomposed rock)

Fig. 3. Time of accumulation of methane of explosive concentration ($C = 4.4\%$) at varied gas penetrability κ , m^2 : $1 - 10^{-16}$, $2 - 10^{-17}$, $3 - 10^{-18}$