

УДК 622.81

В.Г. Гринев, А.И. Сергиенко, А.А. Подрухин

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ МЕТАНА ИЗ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА ЗАКРЫТЫХ ШАХТ

ИФГП НАН Украины

В статті наведено аналітичні дослідження процесу міграції метану з виробленого простору закритих шахт до денної поверхні по різних шляхах. На основі відомих формул розроблений новий алгоритм розрахунку часу міграції і кількості метану, що виділяється на денну поверхню. Представлено результати розрахунків міграції метану за даними двох закритих шахт: «Запореваляна №2» і «Куйбишевська», а також результати натурних досліджень по вимірах змісту метану в ґрунтовому повітрі в межах гірничих відведень даних шахт. Дані аналітичних і натурних досліджень є зіставними між собою.

Ключові слова: метан, закрыта шахта, геодинамічна зона, алгоритм розрахунку, кількість газу, час міграції

V.G. Grinev, A.I. Sergienko, A.A. Podrukhin

STUDIES OF METHANE MIGRATION PROCESS FROM THE WASTE SPACE OF THE ABANDONED MINES

Methane migration ways from waste space of abandoned coal mines to earth surface are analysed. The new computational procedure for migration time and rate is proposed based on well-established relations. Theoretical predictions of methane emission from abandoned mines «Zaperevalnaya №2» and «Kuybyshevskaya» are presented in comparison with field methane content measurement data for allotments of these mines. Satisfactory matching is revealed.

Keywords: methane, abandoned mine, geodynamical zone, computation procedure, gas quantity, migration time

На данный момент в Донецкой области в стадии закрытия находятся более 60 угольных шахт, а еще более десятка шахт относятся к третьей группе, где проводятся работы по подготовке к ликвидации.

При закрытии любой шахты происходит остановка вентиляционного и насосного оборудования, что неизбежно приводит к заполнению выработанного пространства метаном и дальнейшему его вытеснению водой.

Поскольку газ метан имеет массу меньше воздуха, даже при отсутствии водопритока метан, который накапливается в выработанном пространстве,

под действием собственного избыточного давления начинает мигрировать к дневной поверхности различными путями.

В соответствии с методикой МакНИИ [1] основными естественными путями миграции метана из выработанного пространства на дневную поверхность являются пласты трещиноватых горных пород (песчаники, известняки), имеющие выход на дневную поверхность либо под наносы при моноклиналином залегании в кровле на расстоянии от 35 до 150 мощностей отрабатываемого пласта угля или в замковых частях антиклинальных складок и куполов.

Но, помимо указанных, к таким путям миграции метана следует отнести геодинамические зоны (ГДЗ), о которых известно благодаря изучению геологами и геофизиками верхнего слоя Земли [2–4].

Таким образом, существующая методика не учитывает важный фактор – геодинамическое строение горного массива. Кроме того, она не позволяет прогнозировать количество газа метана и период его миграции к дневной поверхности без предварительного проведения натурных исследований.

В Институте физики горных процессов НАН Украины был разработан алгоритм расчета, с помощью которого для каждой конкретной закрытой угольной шахты можно приближенно определить количество метана, выделяющегося на дневную поверхность по различным путям, и время его прохождения через нарушенный горный массив.

В данной работе рассматриваются случаи полного заполнения метаном выработанного пространства и варианты его миграции к дневной поверхности по пластам подработанных трещиноватых горных пород (согласно методике МакНИИ) и в пределах ГДЗ.

Прежде всего необходимо определить объем метана, который выделится в выработанное пространство закрытой шахты из углепородного массива при отсутствии вентиляции. Для расчета наиболее приемлемым является подход, принятый в ИГД им. А.А. Скочинского [5]. В рассматриваемом случае предлагается определять объем метана, который выделится на 1 пог. м выработанного пространства закрытой шахты при отсутствии вентиляции и дегазационных скважин. Для этого необходимо определить площадь 1 пог. м выработанного пространства f_i , м²:

$$f_i = l_i \cdot 1 \text{ м}, \quad (1)$$

где l_i – ширина выработанного пространства, м.

Соответственно общее количество метана $V(\text{м}^3)$, которое выделяется из углепородного массива по всем отработанным горизонтам, пересекаемым ГДЗ либо проводящим пластом, на 1 пог.м выработанного пространства, может быть рассчитано по формуле [5]:

$$V = \gamma_y f_i \sum_{i=1}^n m_i (x_i - x_{0i}), \quad (2)$$

где γ_y – объемная масса угля, т/м³; x_i , x_{oi} – соответственно природная и остаточная газоносность i -го пласта угля, м³/т; m_i – мощность i -го пласта угля (источника метановыделения), м.

Объем газа метана, который фильтруется через трещиноватый породный массив в пределах ГДЗ за единицу времени Q (м³), может быть определен на основе формулы Дарси [6]:

$$Q = \frac{\Delta P S t}{L \eta} K_T, \quad (3)$$

где S – площадь 1 пог. м дневной поверхности в пределах ГДЗ или проводящего пласта, где выходит метан, м²; t – время фильтрации метана через трещиноватый массив горных пород в пределах ГДЗ либо проводящего пласта, с; L – путь фильтрации метана (расстояние до поверхности), м; η – динамическая вязкость метана (СН₄), Па·с ($\eta = 1138 \cdot 10^{-8}$ Па·с при $T = 35^\circ\text{C}$); K_T – величина коэффициента газопроницаемости проводящего пласта либо углепородного массива в пределах ГДЗ, м².

Величина коэффициента газопроницаемости K_T (м²) в рассматриваемом случае может быть определена по формуле, предложенной ИГТМ НАН Украины для углегазового массива в зоне влияния очистных работ [7]:

$$K_T = \frac{\alpha \Gamma_{\text{тр}} \delta^3}{12}, \quad (4)$$

где α – коэффициент, зависящий от геометрии (извилистости) трещин; ($\alpha = 0,1-1$); $\Gamma_{\text{тр}}$ – густота (частота) трещин, м⁻¹; δ – ширина раскрытия трещин, м.

Для случая миграции метана на дневную поверхность в пределах ГДЗ принимаем значение α одинаковым для всех слоев горных пород, составляющих массив.

В случае, когда проводящий пласт либо зона трещиноватых пород (ГДЗ) имеет определенный угол падения по отношению к дневной поверхности, путь фильтрации метана L (м) от нижнего отработанного горизонта, пересекаемого ГДЗ, до дневной поверхности в пределах ГДЗ может быть определен по формуле

$$L = \frac{H_{\text{п}}}{\sin \beta}, \quad (5)$$

где $H_{\text{п}}$ – глубина залегания нижнего отработанного угольного пласта, пересекаемого ГДЗ, м; β – угол падения плоскости ГДЗ, град.

Перепад давлений метана ΔP на пути его фильтрации к дневной поверхности может быть определен по формуле

$$\Delta P = P_2 - P_1, \quad (6)$$

где P_1 , P_2 – избыточное давление свободного метана соответственно при выходе на поверхность и на нижнем отработанном горизонте, Па.

В данном случае выполняется расчет избыточного давления свободного метана с учетом температурного фактора при установившемся процессе его поступления в выработанное пространство, при котором количество выходящего метана равно количеству поступающего, при этом плотность метана ρ (кг/м³) остается величиной постоянной.

Избыточное давление свободного газа определяется с помощью уравнения газового состояния [8]:

$$P = \rho g R T, \quad (7)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/моль·К; T – абсолютная температура, К.

В данном случае выполняется расчет значений P_2 и P_1 по следующим формулам:

$$P_2 = \rho g R T_H + P_a, \quad (8)$$

$$P_1 = \rho g R T_{\text{ср.год}} + P_a, \quad (9)$$

где ρ – плотность метана (CH₄), $\rho = 0,7168$ кг/м³; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²; T_H – абсолютная температура на нижнем отработанном горизонте, К; $T_{\text{ср.год}}$ – среднегодовая температура на поверхности, для условий Донбасса $T_{\text{ср.год}} = 18^\circ\text{C}$; P_a – атмосферное давление, Па, $P_a = 10^5$ Па.

В случае, когда неизвестна абсолютная температура на нижнем отработанном горизонте, расположенном на глубине H , она может быть рассчитана по формуле [9]:

$$T_H = \Gamma_t (H_\Gamma - h_{\text{с.п.т}}) + T_{\text{ср.год}}, \quad (10)$$

где Γ_t – геотермический градиент, °С/м; H_Γ – глубина залегания нижнего отработанного горизонта, м; $h_{\text{с.п.т}}$ – глубина слоя постоянных температур, м.

Площадь 1 пог. м дневной поверхности в пределах ГДЗ либо проводящего пласта, где выходит метан, S (м²) равна:

$$S = l_B \cdot 1 \text{ м}, \quad (11)$$

где l_B – ширина проводящего пласта либо ГДЗ по падению, м.

Приблизительное время, в течение которого весь данный объем метана выделится на поверхность $T_{\text{выд}}$ (лет), можно определить следующим образом:

$$T_{\text{выд}} = \frac{V}{365 \cdot Q}. \quad (12)$$

На основе предложенного алгоритма был выполнен расчет количества газа метана и времени его миграции к дневной поверхности по ГДЗ с исполь-

зованием данных по закрытым шахтам «Заперевальня №2» и «Куйбышевская» (г. Донецк):

В случае шахты «Заперевальня №2» присутствуют 3 пласта-источника со следующими параметрами:

$$1\text{-й пласт: } m_1 = 1 \text{ м, } x_1 = 18 \text{ м}^3/\text{т, } x_{01} = 8 \text{ м}^3/\text{т, } l_1 = 500 \text{ м, } f_1 = 500 \text{ м}^2;$$

$$2\text{-й: } m_2 = 0,5 \text{ м, } x_2 = 25 \text{ м}^3/\text{т, } x_{02} = 8 \text{ м}^3/\text{т, } l_2 = 2010 \text{ м, } f_2 = 2010 \text{ м}^2;$$

$$3\text{-й: } m_3 = 1 \text{ м, } x_3 = 28 \text{ м}^3/\text{т, } x_{03} = 8 \text{ м}^3/\text{т, } l_3 = 2010 \text{ м, } f_3 = 2010 \text{ м}^2.$$

Глубина залегания нижнего отработанного горизонта $H = 700$ м. Угол падения плоскости ГДЗ $\beta_1 = 15^\circ$.

Общее количество метана, которое выделится из углепородного массива на дневную поверхность, составляет: $V = 8,41 \cdot 10^4 \text{ м}^3$. Период времени, в течение которого весь объем метана мигрирует на дневную поверхность горного отвода шахты, составляет: $T_{\text{выд}} = 5,1$ лет.

Аналогичным способом были выполнены расчеты для шахты «Куйбышевская», где также присутствуют 3 пласта-источника со следующими параметрами:

$$1\text{-й пласт: } m_1 = 1 \text{ м, } x_1 = 16 \text{ м}^3/\text{т, } x_{01} = 7 \text{ м}^3/\text{т, } l_1 = 430 \text{ м, } f_1 = 430 \text{ м}^2;$$

$$2\text{-й: } m_2 = 0,6 \text{ м, } x_2 = 22 \text{ м}^3/\text{т, } x_{02} = 7 \text{ м}^3/\text{т, } l_2 = 1000 \text{ м, } f_2 = 1000 \text{ м}^2;$$

$$3\text{-й: } m_3 = 1 \text{ м, } x_3 = 28 \text{ м}^3/\text{т, } x_{03} = 7 \text{ м}^3/\text{т, } l_3 = 1000 \text{ м, } f_3 = 1000 \text{ м}^2.$$

Глубина залегания нижнего отработанного горизонта: $H = 550$ м. Угол падения плоскости ГДЗ: $\beta_1 = 22^\circ$.

Общее количество метана, которое выделится из углепородного массива на дневную поверхность, составляет: $V = 4,57 \cdot 10^4 \text{ м}^3$. Период времени, в течение которого весь объем метана выделится на дневную поверхность горного отвода шахты, составляет: $T_{\text{выд}} = 4,5$ лет.

На основе вышеприведенного алгоритма, были выполнены расчеты концентрации метана в пробе почвенного воздуха объемом 1 л, заполнение которой происходит в течение 1 мин :

– для горного отвода шахты «Заперевальня №2» $C_{\text{проб}} = 0,6 \%$;

– для горного отвода шахты «Куйбышевская» $C_{\text{проб}} = 0,8 \%$.

Данные результаты расчетов подтверждены натурными замерами, где были зафиксированы следующие значения концентрации метана в пробе почвенного воздуха объемом 1 л:

– для горного отвода шахты «Заперевальня №2» разброс значений $C_{\text{проб}}$ составил 0,1–1,2%;

– для горного отвода шахты «Куйбышевская» разброс значений $C_{\text{проб}}$ составил 0,4–1,0%.

На основе выполненных исследований можно сделать вывод, что предложенный алгоритм расчета позволит оценить ресурс метана закрытых шахт и, в случае необходимости, разработать рекомендации по дегазации конкретного горного отвода закрытой шахты. На данный момент в Украине нет опыта утилизации метана закрытых шахт, но, учитывая опыт других стран,

можно ожидать, что исследования по данной проблеме могут быть весьма перспективными.

1. *Защита* зданий от проникновения метана / Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 2001. – 61 с.
2. *Воевода Б.И., Соболев Е.Г., Савченко О.В.* Геодинамика и ее роль в устойчивом развитии регионов // Наукові праці ДонДТУ: Серія гірничо-геологічна. – Вип. 45. – Донецьк, ДонДТУ, 2002. – С. 88–93.
3. *Гринева В.Г., Подрухин А.А.* Совершенствование методики прогнозирования миграции метана на дневную поверхность из горных выработок ликвидированных шахт // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / НАН Украины, Институт физики горных процессов. – Вып. 8. – 2005. – С. 100–103.
4. *Подрухин А.А.* Методика исследования миграции метана на дневную поверхность в пределах горного отвода ликвидированных шахт // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / НАН Украины, Институт физики горных процессов. – Вып. 10. – 2007. – С. 55–59.
5. *Руководство по дегазации угольных шахт.* – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1990. – 186 с.
6. *Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы физики горных пород. Изд. 3-е. перераб. и доп. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
7. *Костенко В.К., Бокий А.Б.* Изменение физических свойств углегазового массива под влиянием очистных работ / Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 90–97.
8. *Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И.* Аэрология горных предприятий: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 421 с.
9. *Мильничук В.С., Арабаджи М.С.* Общая геология. – М.: Недра, 1979. – 408 с.

Статья поступила в редакцию 18 мая 2009 года